

# **Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben erster Generation**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **D i s s e r t a t i o n**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Heike Hupp**

aus Hafenlohr

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Tag der Einreichung: 21.01.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 09.04.2008

Darmstadt 2008

D17

## **Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Heike Hupp:

## **Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben erster Generation**

© Sierke Verlag, Göttingen  
[www.sierke-verlag.de](http://www.sierke-verlag.de)  
ISBN 978-3-86844-044-7

Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk - einschließlich seiner Teile - ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme.

1. Auflage 2008

## Abstract

In order to highlight print products compared to those of competitors it is necessary to use more than common process colours Cyan, Magenta, Yellow and Black. Often, additional processes like stamping or varnishing are used. Furthermore, spot colours and special effect colours (metallic, pearlescent and interference colours) find their way into printing. Especially interference colour inks pose new challenges in assuring print quality and predicting colour appearance of the printed ink. Since this kind of ink is based on the physical effect of interference, colour appearance changes with respect to illumination and viewing angle. Until now, no measuring device has been introduced in printing industry that allows a measurement of these inks. Moreover, the relationship between printed ink film thickness and colour values is unknown.

Exploratory focuses of this thesis are the topics of quality inspection and process control of printed interference inks. For quality inspection, an investigation regarding the necessary quantity of measuring geometries and suitable angles, that build a measuring device for an appropriate quantification of printed interference inks, is presented. Concerning process control, the influence of the printed ink film thickness on different measured variables, such as density and colour values, is analysed. Thereby evaluation concentrates on instruments using a measuring geometry according to standardisation (measuring geometries:  $45^\circ/0^\circ$ ,  $0^\circ/45^\circ$  or  $d/8^\circ$ ). For the investigations samples with an ink film thickness of  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  up to  $10\text{ }\mu\text{m}$  and more were produced, using a print quality tester and a colour applicator. Results of these samples for different measuring devices known from printing and from other industries were compared and consulted for the analysis. In addition, a theoretical model for the description of colour appearance with subject to printed ink film thickness and changing illumination and viewing conditions was developed.

As first result, this thesis proposes the measuring geometry  $45^\circ/-30^\circ$  in addition to the common measuring geometry  $45^\circ/0^\circ$  for quality inspection. These measuring geometries allow an evaluation of colour appearance near gloss direction as well as for a viewing position far away from gloss. Furthermore, for an implementation of the additional measuring geometry into a measuring device only one additional sensor is needed. The second result of this thesis is the newly developed value  $L_H$  for process control tasks.  $L_H$  describes the difference between the colour value lightness  $L^*$  of the printing substrate and the colour value lightness  $L^*$  of the printed sample.

This thesis presents guidelines for the application and the improvement of colour measurement devices, as they are used in printing industry today, with

reference to quality and process control of printed interference inks. The newly developed value  $L_H$  allows process control with a conventional colour measurement device. For qualifying colour appearance only one additional sensor has to be integrated into existing colour measurement systems.



## Kurzfassung

In der Druckindustrie sind aktuell zwei Tendenzen erkennbar. Einerseits die zunehmende Automatisierung der Druckprozesse, andererseits kommt es zu einem verstärkten Einsatz von Veredelungstechniken wie Lackieren, Prägen und dem Verdrucken von Sonder- und Effektfarben. In diesem Zusammenhang wird eine gleichbleibende bzw. verbesserte Qualität der Druckprodukte gefordert, die eine Weiterentwicklung heute bekannter Mess- und Regelsysteme in Hinblick auf die Veredelungstechniken erfordert. Es hat sich gezeigt, dass für die Veredelung durch gedruckte Interferenzeffektfarben bis heute keine geeigneten Mess- und Regelsysteme vorhanden sind, obwohl sie in der Druckindustrie in zunehmendem Maße eingesetzt werden. Charakteristisch für Interferenzeffektfarben ist die Veränderung der Farbwirkung in Abhängigkeit der Beleuchtungs- und Beobachtungsposition. Dies macht eine Beurteilung mit nur einer Messgeometrie, wie sie in konventionellen Farb- und Dichtemessgeräten üblich ist, unmöglich. Eine rein visuelle Beurteilung steht aber einer weiteren Automatisierung momentan entgegen. Ziel der Arbeit ist es daher, eine praxistaugliche Lösung zur Qualitäts- und zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben zu entwickeln. Zur Lösungsfindung kommen sowohl experimentelle Untersuchungen als auch analytische Modelle zur Anwendung. Im Fokus stehen hierbei gedruckte Interferenzeffektfarben mit variierenden Farbschichtdicken des drucktypischen Bereichs zwischen  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  und  $5\text{ }\mu\text{m}$ .

Bei der Analyse der experimentell gewonnenen und aus den Modellen abgeleiteten Erkenntnisse wird zwischen den Anforderungen der Qualitätskontrolle und denen der Prozesskontrolle unterschieden. Die Qualitätskontrolle erfordert die vollständige Beschreibung der von der gedruckten Farbschicht ausgehenden Farbwirkung. Daher wird hier das Augenmerk auf die Betrachtung der Farbwirkung in Abhängigkeit unterschiedlicher Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtungen gelegt. Im Rahmen einer Prozesskontrolle hingegen wird die Aufgabe gestellt, einen Zusammenhang zwischen den Stellgrößen des Drucks und der Veränderung der Farbwirkung herzustellen. Hierzu wird heute die Messgröße „Dichte“ herangezogen. In dieser Arbeit wird für die bisherige Messgröße „Dichte“ auf ihre Eignung überprüft und eine neue Messgröße abgeleitet. Hierzu werden die Messergebnisse konventioneller Messgeräte der Druckindustrie herangezogen.

Als erstes Ergebnis geht aus dieser Arbeit die Notwendigkeit von mindestens zwei unterschiedlichen Messgeometrien zur Qualitätsbeschreibung gedruckter Interferenzeffektfarben hervor. Für die Messgeometrie mit Beobachtung in

einem großen Differenzwinkel zum Glanzwinkel steht schon heute die  $45^\circ/0^\circ$ -Messgeometrie zur Verfügung. Die Erfassung der Interferenzeffektfarbe erfordert zusätzlich eine Messgeometrie mit Beobachtungsrichtung nahe dem Glanzwinkel. Dies kann in einfacher Weise durch eine Erweiterung heutiger Messgeräte um einen Sensor unter  $-30^\circ$  zur Probennormalen erreicht werden. Der Vorteil dieses Vorschlags liegt in der einfachen Möglichkeit vorhandene Messsysteme anzupassen und somit eine Messung gedruckter Interferenzeffektfarben zu garantieren. Das zweite Ergebnis dieser Arbeit ist die Definition einer neuen Messgröße zur Prozesskontrolle, die als Helligkeitsdifferenz  $L_H$  bezeichnet wird. Diese Messgröße beschreibt die Differenz zwischen der Helligkeit des unbedruckten Bedruckstoffs und der gedruckter Farbschicht. Durch diese Referenzierung der Messgröße auf den Bedruckstoff kann eine direkte Beziehung zwischen Messgröße und gedruckter Farbschichtdicke angegeben werden.

Durch diese Arbeit ist es gelungen Vorgehensweisen zur Nutzung und Verbesserung bisher in der Druckindustrie bekannter Farbmesssysteme in Bezug auf die Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben zu schaffen. So kann durch die neue Größe  $L_H$  eine Prozesskontrolle auch mit konventionellen Farbmesssystemen erfolgen. Soll darüber hinaus die Farbwirkung erfasst werden, ist in bestehende Systeme lediglich ein weiterer Sensor zu integrieren.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin von Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam für die vielen wertvollen Diskussionen und die fürsorgliche Unterstützung meiner Arbeit. Sowohl fachlich als auch menschlich habe ich in meiner Zeit am Fachgebiet sehr viel von Ihnen gelernt.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Q. Kahn (Leiter des Fachgebiets Lichttechnik an der TU-Darmstadt) für die Übernahme meines Koreferates und das Interesse, das er dieser Arbeit entgegen brachte.

Für die Bereitstellung der verwendeten Materialien danke ich den Firmen: Huber Druckfarben, München (Offsetdruckfarben), Sun Chemical/ Hartmann Druckfarben (Flexodruckfarben) und DuPont (Flexodruckklischee). Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Sundermann der Firma Grapho Metronic für die Unterstützung bezüglich der Messtechnik.

Ebenso herzlich danke ich den Studenten, die mich im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten sowie ihrer Tätigkeit als studentische Hilfskräfte unterstützt haben. Ihr Engagement hat erheblich zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen. Besonders hervorheben möchte ich hier Herrn Carsten Bettner. Aber auch meinen Kollegen gilt mein herzlicher Dank, für ihre Unterstützung und die vielen anregenden Fachgespräche. Dank gebührt auch den Herrn Creter und Herrn Rettig für die Werkstattarbeiten sowie Herrn Jakobi für Elektroarbeiten, die im Rahmen meiner Arbeit nötig wurden.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Doris Schmidt, die immer ein offenes Ohr für mich hatte und trotz ihrer eigenen Promotion Zeit zum Korrekturlesen meiner Arbeit gefunden hat.

Meiner Familie danke ich sehr herzlich für den Rückhalt und ihre stetige Unterstützung.

Ganz herzlich danken möchte ich meinem Mann Wolfgang Hupp, der mich während der Promotion geduldig und liebevoll unterstützt hat.

Hafenlohr, Januar 2008

Heike Hupp



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Druckprozess .....	3
2.1.1	Druckform .....	4
2.1.2	Druckspannung .....	5
2.1.3	Bedruckstoff .....	6
2.1.4	Druckfarbe .....	6
2.1.5	Druckverfahren .....	10
2.2	Klassifizierung von Interferenzeffektpigmenten .....	14
2.3	Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten .....	17
2.4	Farb- und Dichtemessung .....	23
2.4.1	Remission, Reflexion, optische Dichte und Glanz .....	23
2.4.2	Grundlagen der Farbmeterik .....	27
2.4.3	Dichtemessung (Densitometrie) .....	34
2.4.4	Farbmessung .....	38
2.4.5	Messgeometrien zur Farb- und Dichtemessung .....	39
2.5	Qualitäts- und Prozesskontrolle im Druck .....	45
2.6	Gedruckte Interferenzeffektfarben .....	48
<b>3</b>	<b>Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>Probenherstellung und Auswertung .....</b>	<b>51</b>
4.1	Probenherstellung .....	51
4.1.1	Auswahl der Druckparameter .....	55
4.1.2	Probenherstellung mittels Bedruckbarkeitsgeräten .....	58
4.1.3	Zusätzliche Probenherstellung mittels Stufenspaltrikel .....	60
4.2	Auswertung .....	61
<b>5</b>	<b>Messgeometrien zur Qualitätskontrolle .....</b>	<b>70</b>

II	Inhaltsverzeichnis
5.1	Ergebnisse der Druckversuche ..... 70
5.2	Beschreibung gedruckter Interferenzeffektfarben (Modell) ..... 80
5.2.1	Verteilungsmodell ..... 81
5.2.2	Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten im Glanzwinkel ..... 85
5.2.3	Farbwirkung in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels ..... 89
5.2.4	Gesamtmodell und Darstellung der Ergebnisse ..... 91
5.3	Geeignete Messgeometrien für die Qualitätskontrolle ..... 97
5.3.1	45°/0° (as45)-Messgeometrie als Referenz ..... 98
5.3.2	Messgeometrien entlang der Interferenzlinie als Referenz ..... 100
5.3.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse ..... 104
5.4	Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Flexodruck ..... 106
<b>6</b>	<b>Messgröße zur Prozesskontrolle ..... 110</b>
6.1	Heutige Praxis: Messung der Dichte $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$ ..... 110
6.1.1	Dichtemessung ( $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$ ) anderer Messgeometrien ..... 114
6.2	Messgröße ( $D_{ii}$ ) aus dem Übereinanderdruck mit Schwarz ..... 118
6.3	Messgröße ( $L_H$ ) aus farbmétrischen Größen ..... 122
6.3.1	Ergebnisse der experimentellen Analyse ..... 123
6.3.2	Dichtemessung gedruckter Farbschichten (Modell) ..... 133
6.3.3	Nutzen der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle ..... 138
6.3.4	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bedruckstoffe ..... 148
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick ..... 151</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis ..... 155</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Zusätzliche Auswertungen zu Kapitel 5 ..... 165</b>
A.1	Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben (LithoRed) auf unterschiedlichen Bedruckstoffen ..... 165
A.2	Interferenzeffektpigmente in Druckfarben ..... 171
<b>B</b>	<b>Anhang: Zusätzliche Auswertungen zu Kapitel 6 ..... 173</b>

Inhaltsverzeichnis	III
B.1 Auswertung der Dichte ( $D_K$ , $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$ ) .....	173
B.2 Auswertung der Dichte in der Messgeometrie $45^\circ/-30^\circ$ .....	174
B.3 Auswertung des Übereinanderdrucks der Interferenzfarbe auf Schwarz .....	175
B.4 Gegenüberstellung der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für $L_H$ für unterschiedliche Druckfarben .....	177
B.5 Gegenüberstellung der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für $L_H$ für unterschiedliche Messgeräte .....	178
B.6 Lineare Approximation der Messergebnisse für $L_H$ für die Interferenzeffektdruckfarbe LithoBlue .....	180
<b>C Papierkennwerte .....</b>	<b>181</b>





## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
d. h.	das heißt
Gl.	Gleichung
max.	maximal
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungweise
Hrsg.	Herausgeber
i. a.	im Allgemeinen
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
SCI	Messung mit Kugelgeometrie unter Glanzeinschluss
SCE	Messung mit Kugelgeometrie unter Glanzsausschluss
W1 bis W6	Bezeichnung der eingesetzten Rasterwalzen
CMYK	Skalenfarben (Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz)
RGB	Rot, Grün, Blau
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIEXYZ	CIE-Normvalenzsystem
CIELAB	CIE-Farbsystem mit visuell gleichabständigen Farbraum (Entwicklung 1976)
ISO	Internationale Organisation für Normung, internationale Vereinigung der Standardisierungsgremien
DIN	Deutsches Institut für Normung
ASTM	American Society for Testing and Materials

## Symbole und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	-	Normlichtart (Glühlampenlicht)
$A_{\text{Pigment}}$	mm <sup>2</sup>	Flächeninhalt eines Effektpigments
$A_{\text{Druckfläche}}$	mm <sup>2</sup>	Flächeninhalt einer bedruckten Fläche
$a^*$	-	Grün-Rot-Wert (CIELAB-Farbsystem)
$b^*$	-	Blau-Gelb-Wert (CIELAB-Farbsystem)
C	-	Cyan
D	-	optische Dichte, im Druck häufig nur Dichte genannt
$D(\lambda)$	-	spektrale Verteilung der Dichte (Dichtekurve)
$D_\lambda$	-	spektrale Dichte
$D_{50}, D_{65}$	-	Normlichtarten (Tageslicht)
$D_{\bar{U}}$	-	Dichte der Effektfarbe berechnet aus dem Übereinanderdruck mit Schwarz
$D_\infty$	-	Sättigungsdichte nach Tollenaar
$d_{\text{TiO}_2}$	nm	Beschichtungsdicke des Titandioxid
d	-	diffus
$d_{\text{Pigment}}$	µm	mittlere Gesamtdicke eines Effektpigments
F	%	Flächendeckung
$F_{\text{unbedeckt}}$	%	Unbedeckte Druckfläche
$F_{\bar{u},w}$	%	Flächendeckung einer Pigmentüberlagerung w
$\vec{F}$	-	Farbvalenz
I	cd	Lichtintensität
$I_{\text{ein}}$	cd	eingestrahlte Lichtintensität
$I_{\text{ref}}$	cd	reflektierte Lichtintensität
K	-	Schwarz (Black <u>u</u> , <u>K</u> ey colour)
L	cd/m <sup>2</sup>	Leuchtdichte

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$L_{\text{weiß}}$	$\text{cd/m}^2$	Leuchtdichte eines ideal mattweißen Körpers
$L^*$	-	psychometrische Helligkeit (CIELAB- und CIELUV-Farsystem)
$L^*_{\text{grenz}}$	-	Helligkeitsgrenzwert für große gedruckte Farbschichtdicken (nach CIELAB)
$L^*_H$	-	Helligkeitswert (nach CIELAB- bzw. CIELUV) berechnet aus dem Remissionsquotienten $\beta_H$
$L_H$	-	Helligkeitsdifferenz
$L_{H,\text{grenz}}$	-	Grenzwert (Sättigungswert) der Helligkeitsdifferenz $L_H$ für große Farbschichten
$l_{\text{Pigment}}$	mm	mittlere Teilchenlänge eines Effektpigments
$M$	-	Magenta
$m$	-	Steigung der relativen Dichte $D/D_\infty$ pro Steigerung der Farbschichtdicke $s$ bei kleinen Farbschichtdicken
$m_{\text{Pigment}}$	g	Gewicht eines Effektpigments
$m_{\text{Druckfarbe}}$	g	Gewicht der gedruckten (applizierten) Druckfarbschicht
$m_{\text{Druckform\_ohne}}$	g	Gewicht der nicht eingefärbten Druckform
$m_{\text{vor}}$	g	Gewicht der eingefärbten Druckform vor dem Druck
$m_{\text{nach}}$	g	Gewicht der abgedruckten Druckform (Druckform nach dem Druck)
$n$	-	Brechungsindex
$n \cdot d$	nm	optische Weglänge beim Durchgang durch dünne Schichten
$p$	%	Massenanteil des Effektpigments an der übertragenen Farbschicht
$p_{\text{max}}$	-	max. Anzahl an Pigmenten auf einer bedruckten Fläche
$R(\varepsilon_1)$	%	Reflexionsgrad, Reflexionsvermögen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$R_{\perp}$	-	senkrechte Komponente des Reflexionsgrads (Vektor des elektrischen Feldes senkrecht zur Einfallsebene)
$R_{\parallel}$	-	parallele Komponente des Reflexionsgrads (Vektor des elektrischen Feldes parallel zur Einfallsebene)
$r(\varepsilon_1)$	-	Reflexionskoeffizient
$\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$	-	Primärvalenzen (reelle Primärvalenzen des RGB-Farbsystems)
$S(\lambda)$	-	spektrale Verteilungsfunktion für eine Lichtart bzw. Strahlung allgemein
$s$	$\mu\text{m}$	gedruckte Farbschichtdicke
$s(\lambda)$	-	Empfindlichkeitskurve
$T_f$	K	Farbtemperatur
$w$	-	Zählwert $w = 1, 2, 3, \dots$ für die Anzahl der Pigmentüberlagerungen
$\ddot{u}$	-	Kennzeichnung der Überlagerung von Pigmenten
$\ddot{u}_{\max}$	-	Maximal mögliche Überlagerung an Effektpigmenten
$V_{\text{Pigment}}$	$\text{mm}^3$	Volumen eines Effektpigments
$Y$	-	Yellow (Gelb)
$X, Y, Z$	-	Normspektralwerte des CIEXYZ-Farbsystems
$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$	-	Primärvalenzen (virtuelle Primärvalenzen des CIEXYZ-Farbsystems)
$\left. \begin{array}{l} \bar{x}(\lambda), \\ \bar{y}(\lambda) \text{ und} \\ \bar{z}(\lambda) \end{array} \right\}$	-	Normspektralwertfunktionen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	—	Abnahmestärke bei zunehmendem Differenzwinkel
$\beta$	%	Remissionsgrad
$\beta(\lambda)$	%	spektraler Remissionsgrad, auch Remissionskurve
$\beta_H$	-	Remissionsquotient
$\gamma$	°	Aspektwinkel: Differenzwinkel zwischen Beobachtungswinkel und Glanzwinkel
$\Delta$	-	Differenz (meist verwendet im Zusammenhang mit einem Soll-Ist-Vergleich)
$\Delta E_{ab}$	-	Farbabstand im CIELAB-Farbsystem
$\Delta\varphi$	-	Phasendifferenz
$\delta\varphi$	-	Phasensprung
$\varepsilon_1$	°	Einstrahlwinkel bezogen auf die Probensenkrechte
$\varepsilon_1'$	°	Reflexionswinkel
$\varepsilon_2$	°	Beobachtungswinkel bezogen auf die Probensenkrechte
$\varepsilon_1''$	°	Brechungswinkel bezogen auf die Probensenkrechte
$\varphi(\lambda)$	-	Farbreizfunktion
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\rho$	%	(äußerer) Reflexionsgrad
$\rho(\lambda)$	%	spektraler Reflexionsgrad
$\rho_{\text{Druckfarbe}}$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte der Druckfarbe
$\rho_{\text{Pigment}}$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte (eines Effektpigments)
$\phi$	lm	Lichtstrom
$\varphi(\lambda)$	-	Farbreizfunktion
$\Sigma$	-	Summe
$\tau(\lambda)$	%	spektraler Transmissionsgrad
$\xi$	°	Glanzwinkel $\xi = \varepsilon_1'$



# 1 Einleitung

Druckprodukte begegnen uns überall im täglichen Leben. Sie dienen zur Lektüre am Frühstückstisch in Form einer Zeitung, zur Verpackung von Lebensmitteln und Luxusgütern, als Informationsschriften oder zur Werbung (z. B. Poster). Bezüglich ihrer Herstellung sind derzeit zwei grundlegende Trends festzustellen. Zum einen ist der zunehmende Einsatz von Farben und Veredelungsschritten zu nennen. Dieser zeigt sich in allen Anwendungsbereichen des Drucks, vom Zeitungsdruck über den Akzidenzdruck bis hin zum hochwertigen Verpackungsdruck. Wurde beispielsweise vor zehn Jahren eine Zeitung noch vollständig in Schwarz-Weiß gedruckt, so sind heute farbige Bilder und Anzeigen nicht mehr wegzudenken. Im hochwertigen Verpackungsdruck ist ein zunehmender Einsatz von Veredelungstechniken (z. B. Lackieren, Prägen, Stanzen und Folienkaschieren) und die Verwendung von Effekt- und Sonderfarben zu beobachten. Diese Veränderung ist beispielsweise bei einem Gang durch eine Parfümerie oder Drogerie feststellbar. Teure Markenprodukte zeichnen sich (neben ihrem Namen) häufig durch besonders aufwändig gestaltete Verpackungen mit Metallic-, Perlglanz- oder Interferenzeffekten aus.

Zum Anderen ist die zunehmende Automatisierung der Druckprozesse zu nennen. Der stärker werdende Wettbewerb zwischen den Druckbetrieben führte in den letzten Jahren zu der Forderung nach kürzeren Produktionszeiten und einer Einsparung an Druckmaterialien und Personal. Daher wurden aufseiten der Maschinenhersteller mehrere Hilfseinrichtungen zur Vereinfachung von Produktionsabläufen (z. B. der automatische Plattenwechsel und die automatisierte Farbzufuhr) und Einrichtungen zur Qualitäts- und Prozesskontrolle (Farb- und Dichtemesssysteme) entwickelt und weitestgehend integriert. Die entwickelte Farb- und Dichtemesstechnik basiert auf der Messung von Skalen- und Sonderfarben und wird meist als Offline-Systeme (Hand- oder Leitstandsmesssysteme) bereitgestellt. Langfristig wird auch hier eine vollständige Integration in Form von Inline-Systemen angestrebt.

Werden beide Tendenzen zusammengefasst, ergibt sich in Bezug auf veredelte Druckprodukte die Forderung nach einer Automatisierung des Druck- und des Veredelungsprozesses. Diese soll eine Qualitäts- und Prozesskontrolle einschließen, doch Messtechniken zur Beurteilung der Farb- und Dichtewerte veredelter Druckprodukte fehlen bisher weitgehend. Aus diesem Umstand wird die Aufgabenstellung dieser Arbeit abgeleitet, deren Ziel es ist eine Qualitäts- und Prozesskontrolle für gedruckte Interferenzeffektfarben zu ermöglichen.

Das Kapitel Grundlagen vermittelt eine Literaturübersicht hinsichtlich des Druckprozesses, der Interferenzeffektfarben sowie der Prozess- und Qualitätskontrolle im Druck. Im ersten Abschnitt wird der Druckprozess und die mit ihm verbundenen Druckparameter vorgestellt. Der zweite und dritte Abschnitt gibt eine Klassifizierung von Interferenzeffektpigmenten und eine Darstellung ihrer Farbwirkung. Nachfolgend auf die Darstellung der Grundlagen der Farb- und Dichtemessung wird auf die Qualitäts- und Prozesskontrolle im Druck eingegangen. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels führt die Grundlagen in Bezug auf gedruckte Interferenzeffektfarben zusammen. In diesem Zusammenhang wird auf den Aspekt der gedruckten Farbschichtdicken, gegenüber den zur Charakterisierung von Interferenzeffektpigmenten herangezogenen Farbschichtdicken eingegangen. In Kapitel 3 wird aus diesen Erkenntnissen die Zielsetzung abgeleitet. Das Kapitel 4 stellt die Probenherstellung und die Auswertung der Druckproben dar. Es wird auf die Auswahl des Herstellungsprozesses mittels Bedruckbarkeitsgeräten, die damit verbundene Festlegung der Druckparameter und die zusätzliche Herstellung von Druckproben durch Nutzung eines Stufenspaltrakels eingegangen. Im Abschnitt Auswertung werden die Messgeräte, die Messpositionen und die Berechnung der benötigten Farb- und Dichtewerte erläutert. Die Kapitel 5 und Kapitel 6 beschäftigen sich mit der Analyse der gewonnenen Messwerte. Hierbei wird in Kapitel 5 auf den Aspekt der Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben und die hierzu notwendigen Messgeometrien eingegangen. Nach einer Darstellung der Ergebnisse der Druckversuche wird ein Modell zur Beschreibung gedruckter Interferenzeffektfarben entwickelt. Aus den Erkenntnissen beider Abschnitte wird nachfolgend eine geeignete Messgeometrie abgeleitet und die Übertragbarkeit auf andere Druckverfahren überprüft. Kapitel 6 widmet sich der Suche nach einer zur Prozesskontrolle geeigneten Messgröße bzw. Messverfahren. Zunächst erfolgt eine Prüfung der heute üblichen Messgröße Dichte in der bekannten  $45^\circ/0^\circ$ -Messgeometrie und in weiteren Messgeometrien. Im folgenden Abschnitt wird eine neue Messgröße  $D_U$ , welche aus dem Übereinanderdruck mit Schwarz resultiert, vorgestellt. Der letzte Abschnitt des Kapitels 6 stellt die neue Messgröße  $L_H$  und ihre Herleitung aus einem Modell zur Dichtemessung gedruckter Farbschichten dar. Darüber hinaus wird auf die Allgemeingültigkeit dieser Messgröße  $L_H$  für alle untersuchten Druckfarben und Bedruckstoffe eingegangen. Am Ende dieser Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Ferner wird ein Ausblick auf weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet gedruckter Interferenzeffektfarben gegeben.



## 2 Grundlagen

Der erste Abschnitt dieses Kapitels vermittelt ein Verständnis für die Herausforderungen, die an die Qualitäts- und Prozesskontrolle im Druck gestellt werden. Hierzu erfolgt einleitend die Darstellung grundlegender Prinzipien des Druckens. Der zweite Abschnitt dieses Kapitels befasst sich mit Interferenzeffektpigmenten. In diesem Zusammenhang wird eine Definition für Interferenzeffektfarben der ersten Generation gegeben. Im dritten Abschnitt werden heute übliche Messverfahren und Messgeräte zur Charakterisierung von Interferenzeffektpigmenten und zur Farb- und Dichtemessung in der Druckindustrie vorgestellt. In diesem Zusammenhang erfolgt eine kurze Einführung in die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen der Farbmeterik. Im nachfolgenden vierten Abschnitt werden die zuvor erläuterten Unterschiede der Densitometrie und Farbmessung in den Zusammenhang der Qualitäts- und Prozesskontrolle eingeordnet. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Darstellung der Anwendung von Interferenzeffektfarben im Druck und der damit verbundene Stand der Technik und Forschung.

### 2.1 Druckprozess

„Unter Drucken versteht man im allgemeinen Sinne die Vervielfältigung zweidimensionaler Vorlagen mit textlichen und bildlichen Darstellungen in beliebiger Anzahl durch das Übertragen einer Druckfarbe auf einen Bedruckstoff.“ [DFT99]. Hierbei steht insbesondere die korrekte Wiedergabe von Farbvorlagen im Vordergrund. Um dies zu erreichen, steht heute eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung. Die bekanntesten Druckverfahren sind der Offset-, der Flexo-, der Tief- und der Siebdruck. Sie werden als konventionelle Druckverfahren bezeichnet und grenzen sich von den digitalen Druckverfahren insbesondere durch das Vorhandensein einer festen Druckform ab<sup>1</sup>.

Allen konventionellen Druckverfahren sind folgende Verfahrensparameter gemeinsam [TES97]:

---

<sup>1</sup> Weitere Informationen zu den unterschiedlichen konventionellen und digitalen Druckverfahren können der Literatur entnommen werden, z. B. [KIP00].

- Druckform,
- Druckspannung bzw. Druckkraft,
- Bedruckstoff und
- Druckfarbe.

Die Voraussetzungen sind in Abbildung 2-1 a) anhand der Darstellung eines Blockschaltbildes und in Abbildung 2-1 b) anhand eines generalisierten Druckwerks dargestellt. Nachfolgend wird auf die einzelnen Voraussetzungen detailliert eingegangen.

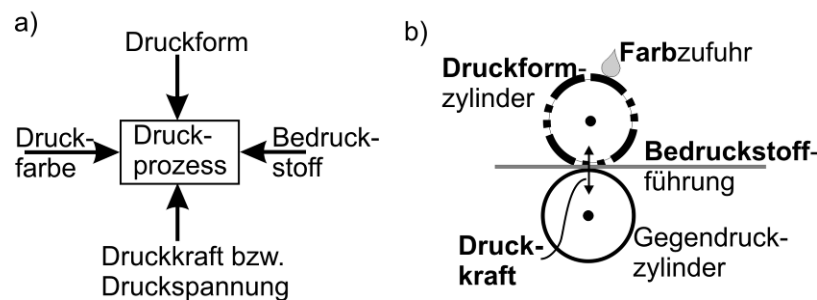


Abbildung 2-1: Voraussetzungen für den Druckprozess (in Anlehnung an [TES97])  
Darstellungsweisen: a) Blockschaltbild, b) generalisiertes Druckwerk

### 2.1.1 Druckform

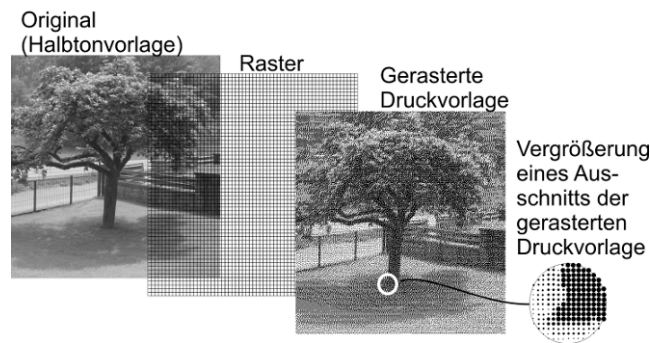
In der Druckform werden die zu übertragenden Text- und Bildinformationen gespeichert. In der Regel wird sie auf einem Druckformzylinder befestigt.

Die Druckformen des Offset-, des Flexo- und des Siebdrucks kennen in der Wiedergabe von Bildinformationen nur zwei binäre Zustände [TES97]:

- Bildstellen, die Druckfarbe übertragen und
- Nichtbildstellen, die keine Druckfarbe übertragen.

Dies hat zur Folge, dass für alle Bildstellen immer die gleiche Farbmenge bzw. Farbschichtdicke übertragen wird. Es ist also nicht möglich unterschiedlich dicke Farbschichten, die zu einer Veränderung des Helligkeitseindrucks im gedruckten Bild führen, sogenannte Grauverläufe, zu realisieren. Für die Reproduktion von Bildern (Halbtonvorlagen<sup>2</sup>) ist jedoch die Erzielung unterschiedlicher Helligkeitseindrücke von essenzieller Bedeutung.

<sup>2</sup> Halbtonvorlagen bestehen aus kontinuierlichen Tonwerten. Bspw. ist in einem Schwarz-Weiß-Bild eine Skala von unterschiedlichen Grautönen, die von Schwarz über ein Grau bis zum Weiß reicht, zu finden [GOL93].



*Abbildung 2-2: Reproduktion von Originalen (Halbtonvorlagen) im Druck heißt: Grau- bzw. Farbverläufe, die sogenannten Halbtöne, durch Rasterung wiederzugeben (in Anlehnung an [TES97]).*

Infolge der unveränderlichen Farbübertragung durch den Druckprozess sind die Bildinformationen der Halbtonvorlagen, entsprechend den drucktechnischen Anforderungen, in Bildstellen und Nichtbildstellen umzuwandeln. Diese Umwandlung beruht auf der Grundlage der Rasterung<sup>3</sup>. Hierdurch lassen sich, wegen des begrenzten Auflösungsvermögens des Auges, unterschiedliche Helligkeitseindrücke bei gleichbleibender Farbschichtdicke erzielen. Bei der Rasterung wird über das Original ein Gitter, das sogenannte Raster gelegt, welches die Bildinformationen der Vorlage in kleinere Teilflächen aufteilt (Abbildung 2-2).

Typische Raster liegen für den Offsetdruck bei 60 Linien/cm und für den Flexodruck bei etwa 48 Linien/cm [KIP00]. Durch Rasterpunkte unterschiedlicher Größen und/oder mit einer variablen Anzahl an Druckpunkten innerhalb eines Rasterfeldes wird im Zusammenwirken mit der unbedeckten Fläche im Auge des Betrachters ein hellerer oder dunklerer Eindruck erzielt.

### 2.1.2 Druckspannung

Der Begriff der Druckspannung bezeichnet die Anpresskraft bzw. die Anpressdrücke, welche zwischen Druckform- und Gegendruckzylinder benötigt werden, um eine Farbübertragung von der Druckform auf den Bedruckstoff zu

<sup>3</sup> Raster sind in druckende und nicht druckende Bildelemente zerlegte Flächen, wobei die Größe und/oder Anzahl der Bildelemente pro Fläche entsprechend den Tonwerten der Vorlage variiert. Im Wesentlichen wird zwischen Amplitudenmodulierter (AM-) und Frequenzmodulierter (FM-) Rasterung unterschieden [KIP00].

erzielen. In Abhängigkeit des Druckverfahrens werden unterschiedlich große Anpresskräfte notwendig. Typische Anhaltswerte sind in Tabelle 2-1 gegeben.

Aus Tabelle 2-1 geht hervor, dass für den Flexodruck, aufgrund der sehr weichen Druckform, die geringsten Druckspannungen bzw. Druckkräfte benötigt werden. Zum Anderen ist ersichtlich, dass im Tiefdruck hohe Anpressdrücke notwendig sind.

*Tabelle 2-1: Anhaltswerte für die notwendigen Anpressdrücke in Abhängigkeit des Druckverfahrens [KIP00]*

<b>Druckverfahren</b>	<b>Anhaltswerte für den Anpressdruck</b>
Offsetdruck	0,8 ... 2 MPa
Flexodruck	0,1 ... 0,5 MPa
Tiefdruck	1,5 ... 5 MPa

### 2.1.3 Bedruckstoff

Der Begriff „Bedruckstoff“ bezeichnet allgemein den Werkstoff auf den gedruckt wird. Je nach Druckverfahren können Papiere, Kartonagen, Folien, Bleche und Kunststoffe bedruckt werden. Am häufigsten erfolgt der Druck auf unterschiedlichen Papieren.

Für den Offsetdruck werden durch ISO 12647-2 fünf unterschiedliche Papierklassen definiert:

1. glänzend gestrichenes Bilderdruckpapier,
2. matt gestrichenes Bilderdruckpapier,
3. glänzendes Rollenoffsetdruckpapier,
4. ungestrichenes Papier (Naturpapier)
5. und ungestrichenes gelbliches Papier.

In den weiteren Teilen der ISO-Norm wird diese Einteilung der Papiere für andere Druckverfahren erweitert [ISO 12647].

### 2.1.4 Druckfarbe

Das Römp Lexikon definiert den Begriff „Druckfarbe“ als „Sammelbegriff für farbmittelhaltige Zubereitungen mit unterschiedlicher Konsistenz, die

ausschließlich mittels einer Druckform auf einen Bedruckstoff übertragen und dort als Farbfilm fixiert werden“ [RÖM98].

Druckfarben setzen sich aus vier Hauptbestandteilen zusammen: dem filmbildenden Bindemittel, dem Löse- oder Verdünnungsmittel, dem färbendem Bestandteil (Farbmittel) und Hilfsstoffen (Additiven). Der prozentuale Anteil der Bestandteile ergibt sich in Abhängigkeit der verschiedenen Druckverfahren. Eine allgemeine Darstellung der prozentualen Verteilung ist Abbildung 2-3 zu entnehmen [RÖM98].

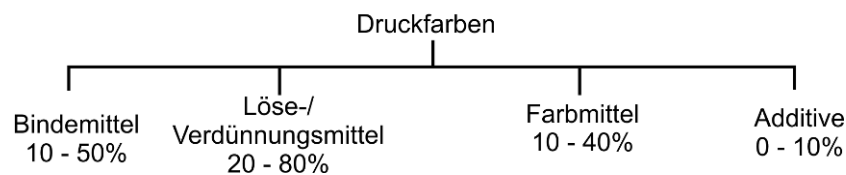


Abbildung 2-3: Bestandteile einer Druckfarbe [RÖM98]

In Hinblick auf die Farbwirkung einer Druckfarbe tragen lediglich die Farbmittel aktiv bei. Veränderungen der Farbwirkung aufgrund der anderen Bestandteile sind hingegen unerwünscht. Sie können als farblos (transparent) angenommen werden.

Unter dem Oberbegriff Farbmittel werden Pigmente und Farbstoffe zusammengefasst. Farbstoffe gehen mit einem Anwendungsmittel in Lösung. Pigmente hingegen sind Substanzen, die in einem Anwendungsmedium praktisch unlöslich sind [RÖM98]. Aufgrund ihres Deckvermögens, der Lichtehttheit sowie der gesundheitlichen Unbedenklichkeit werden in Druckfarben fast ausschließlich Pigmente eingesetzt. Abbildung 2-4 zeigt neben der Unterteilung der Farbmittel in Pigmente und Farbstoffe eine weitere Untergliederung in die einzelnen Pigmenttypen.

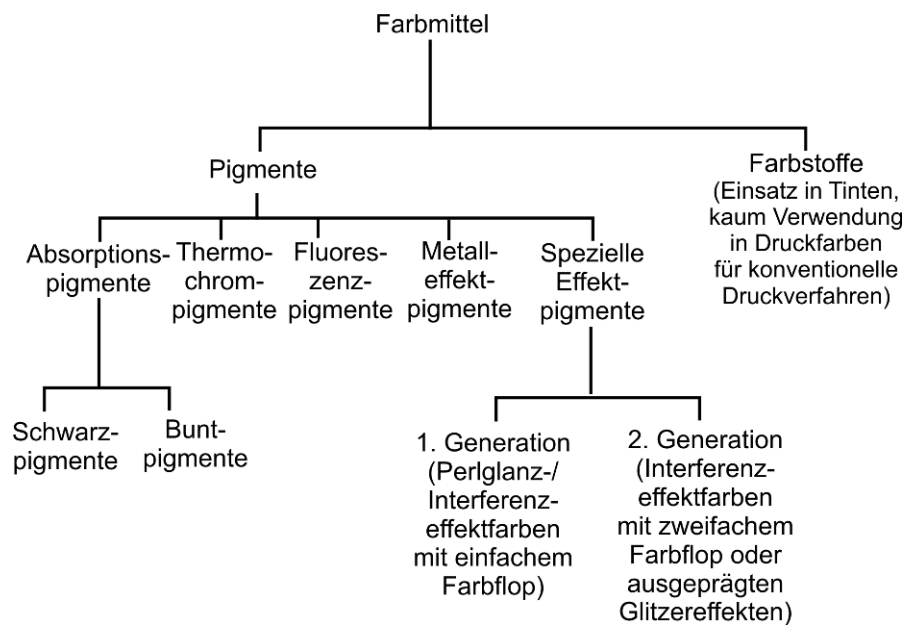


Abbildung 2-4: Unterteilung der Farbmittel in Pigmente und Farbstoffe sowie eine weitere Detaillierung der unterschiedlichen Pigmenttypen (in Anlehnung an [DIN 55944] und [PFA07a])

Die Reproduktion von Farbvorlagen im Druck erfolgt heute vorwiegend über die vier Skalenfarben Cyan (C), Magenta (M), Yellow<sup>4</sup> (Y) und Black<sup>5</sup> (K), kurz CMYK. Die in ihnen verwendeten Pigmente gehören zur Gruppe der Absorptionspigmente. Die Farbwirkung von Absorptionspigmenten basiert auf den physikalischen Effekten der selektiven Absorption und/oder Streuung [VÖL01]. Typische Durchmesser der Absorptionspigmente liegen in einem Größenbereich von 0,1 µm bis 1 µm. Ihre Größe liegt damit zum Teil im Bereich der Lichtwellenlängen [PFA07b].

Neben den Absorptionspigmenten werden heute im Druck zur Veredelung bzw. Erzielung besonderer Effekte Pigmente eingesetzt (Abbildung 2-4), deren Farbwirkung nicht ausschließlich auf Absorptions- und Streueffekte zurückzuführen ist. Hierzu zählen folgende Pigmenttypen (in Anlehnung an [DIN 55944] und [PFA07a]):

- Thermochrompigmente:

Selektive Absorption in Abhängigkeit von der Temperatur.

<sup>4</sup> Yellow ist die englische Bezeichnung für Gelb. Aufgrund der Verwendung der Abkürzung G für Grün (Green) wird die Abkürzung Y für Yellow verwendet.

<sup>5</sup> Die Abkürzung K wird für die Druckfarbe Schwarz, im Englischen für Key colour bzw. Black, verwendet. Die Abkürzung B hingegen steht für Blau bzw. blue.

- Leuchtpigmente:  
Absorption von Wellenlängen der Strahlung aus den ultravioletten und sichtbaren Wellenlängenbereich und unmittelbare (Fluoreszenz) oder zeitlich verzögerte (Phosphoreszenz) Abstrahlung der Energie meist in einem höheren Wellenlängenbereich.
- Metalleffektpigmente:  
Metallische (gerichtete) Reflexion an überwiegend flächig ausgebildeten und ausgerichteten metallischen Pigmentteilchen.
- Spezielle Effektpigmente:  
Perlglanz- und Interferenzeffektpigmente der ersten und zweiten Generation (Kapitel 2.2), deren Farbwirkung auf dem Interferenzeffekt dünner Schichten beruht.

Neben der Unterteilung in die Pigmenttypen ist auf eine weitere Eigenschaft der Druckfarben in Bezug auf die Farbwirkung einzugehen. Im Gegensatz zu Anstrichmitteln (z. B. Wandfarben) oder Autolacken haben Druckfarben einen lasierenden Charakter. Vereinfachend lässt sich dieser Charakter mit einem Farbfilter beschreiben, der in Abhängigkeit seiner Dicke und Färbung mehr oder weniger Licht transmittiert. Im Druck bedeutet dies, dass in Abhängigkeit der Pigmentierung (Anzahl der Pigmente in einer Druckfarbe) und der gedruckten Farbschichtdicke die Reflexion am Bedruckstoff mehr oder weniger am Gesamtfarbeindruck beteiligt ist. Ferner kommt es bei einem Überlappendruck mehrerer Druckfarbschichten unterschiedlicher Farbwirkung zu einer so genannten subtraktiven Farbmischung<sup>6</sup>.

In der ISO-Norm ISO 2846 werden der Einfluss der Farbschichtdicke und der Pigmentierung für die Skalenfarben CMYK in Abhängigkeit des gewählten Druckverfahrens beschrieben. Dabei unterscheiden sich die Druckfarben der unterschiedlichen Druckverfahren insbesondere durch ihre Viskosität. So sind Tief- und Flexodruckfarben als dünnflüssig zu bezeichnen. Offsetdruckfarben zeichnen sich durch eine sehr hohe Viskosität und ihren thixotropen Charakter aus. Dies macht eine Erweiterung des in Abbildung 2-1 b) gezeigten generalisierten Farbwerks um mehrere Farbwerkswalzen zur Vergleichmäßigung und Verflüssigung der Druckfarbe notwendig. Im

---

<sup>6</sup> Unter subtraktiver Farbmischung wird die Mischung aller (nicht selbstleuchtenden) Körperfarben verstanden. Dem Licht werden unterschiedliche Wellenlängenanteile entnommen. Helligkeit wird bei der subtraktiven Farbmischung abgebaut. [KIP00]

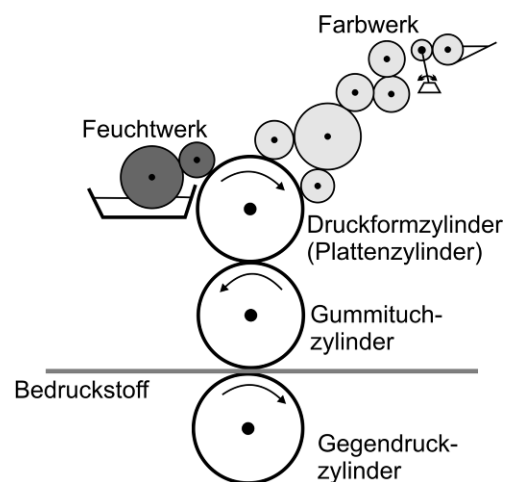
Gegensatz dazu können die dünnflüssigen Tief- und Flexodruckfarben nahezu direkt übertragen werden.

### **2.1.5 Druckverfahren**

Im Folgenden wird ausschließlich auf die, in dieser Arbeit anhand von Bedruckbarkeitsversuchen berücksichtigten, Druckverfahren Offset und Flexodruck eingegangen. Darüber hinaus werden insbesondere die Besonderheiten der Farbwerke beschrieben, da über sie maßgeblich die Farbwirkung des Drucks beeinflusst werden kann.

Der Offsetdruck ist heute das bedeutendste Druckverfahren. Ca. 80 % aller in Europa gedruckter Faltschachteln und 45 % aller Verpackungen weltweit werden im Offsetdruckverfahren gedruckt [SCH07]. Aufgrund der Lage der bildgebenden und nichtbildgebenden Stellen auf einer Ebene zählt der Offsetdruck zu den Flachdruckverfahren [TES97]. Das Flachdruckprinzip macht, abweichend zu dem im Rahmen des Druckprozesses vorgestellten „generalisierten Druckwerk“, ein Feuchtwerk zur Befeuchtung der Druckform nötig, siehe Abbildung 2-5. Darüber hinaus zeichnet sich der Offsetdruck als ein indirektes Druckverfahren aus, d. h., die in der Druckform gespeicherte Information wird nicht direkt sondern über einen Zwischenträger, den Gummituchzylinder, übertragen. Nach der Einfärbung der Druckform durch das Farbwerk erfolgt die Übertragung des Bildes zunächst auf den Gummituchzylinder und von dort aus weiter auf den Bedruckstoff, der zwischen Gummituch- und Gegendruckzylinder geführt wird.



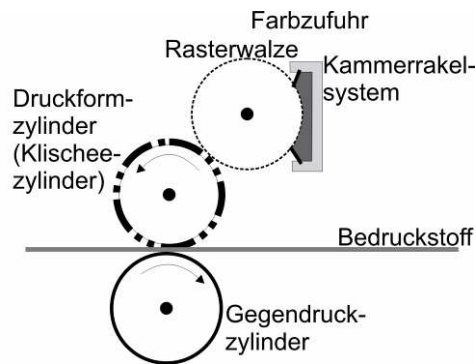


*Abbildung 2-5: Prinzipieller Aufbau eines Offsetdruckwerks, gekennzeichnet durch ein Farbwerk, ein Feuchtwerk, einen Druckform-, einen Gummituch- und einen Gegendruckzylinder (in Anlehnung an [KIP00])*

Durch das Farbwerk wird die Farbmenge, welche auf die Druckform und von dort aus auf den Bedruckstoff übertragen wird, bestimmt. Der Aufbau des Farbwerks mit einer großen Anzahl an Farbwerkswalzen zur Vergleichmäßigung und Verflüssigung der Druckfarbe und die Unterteilung des Farbkastens durch Farbschieber in sogenannte Farbzonen (Abbildung 2-6a) sind kennzeichnend für die Farbzufuhr im Offsetdruck.

Durch die Farbschieber ist in Abhängigkeit der durch das Druckbild benötigten Farbmenge eine gezielte Einstellung der Farbzonenöffnung möglich. Abbildung 2-6 a) zeigt den Blick in den Farbkasten eines Offsetdruckwerkes. Zu sehen ist die deutliche Unterscheidbarkeit zwischen den Farbzonen in Abhängigkeit der Farbzonenöffnung über der Breite des Farbkastens. Darüber hinaus ist in Abbildung 2-6 b) eine schematische Darstellung der Farbübertragung aus dem Farbkasten auf den Druckbogen dargestellt. In Abhängigkeit der Farbzonenöffnung ergibt sich im Farbwerk ein Farbprofil, welches die gedruckte Farbschichtdicke auf dem Druckbogen bestimmt. Aufgrund der Farbwerkskonstruktion mit unterschiedlich großen Farbwerkswalzen lassen sich das Farbprofil und somit die gedruckten Farbschichtdicken nur über die Formatbreite, nicht aber über die Drucklänge beeinflussen.





*Abbildung 2-7: Prinzipieller Aufbau eines Flexodruckwerks, gekennzeichnet durch die Farbzufuhr (Kammerrakelsystem und Rasterwalze), den Druckformzylinder (Klischeezylinder) und den Gegendruckzylinder  
[in Anlehnung an DFT99]*

Im Gegensatz zum Offsetdruck ist eine Variation der Farbmenge über der Formatbreite nur bedingt möglich. Das übertragbare Farbvolumen und damit die übertragbare Farbschichtdicke wird im Wesentlichen durch die gewählte Rasterwalze bestimmt. Die Eigenschaften von Rasterwalzen werden durch das Schöpfvolumen (in  $\text{ml}/\text{m}^2$  bzw. in  $\text{g}/\text{m}^2$ ) gekennzeichnet. Soll eine Variation der Farbmenge über der Formatbreite erfolgen, muss eine sogenannte Bänderwalze<sup>7</sup> eingesetzt werden.

Eine Veränderung der übertragenen Farbmenge ist nur global über die Wahl der Rasterwalze, die Druckspannung, der Beistellung zwischen Rasterwalze und Druckzylinder und/oder eine Veränderung der Viskosität der Druckfarbe möglich. Im Vorfeld des Auflagedrucks stellt die Auswahl der Rasterwalze die Hauptstellgröße dar. Während des Druckprozesses erfolgt in der Praxis die Variation der übertragenen Farbmenge über eine Veränderung der Viskosität der Druckfarbe. Sind größere Unterschiede in der gedruckten Farbschichtdicke notwendig, muss mit mehreren Druckwerken gearbeitet werden.

Die Vorteile des Flexodruckverfahrens sind insbesondere in dem einfachen Aufbau und der damit verbundenen einfachen Bedienbarkeit des Verfahrens begründet. Werden anfänglich alle Einstellungen in geeigneter Weise getroffen (insbesondere die Wahl der Rasterwalze, der Druckspannung und der Viskosität der Druckfarbe), müssen während des Prozesses keine weiteren Einflussnahmen erfolgen. Darüber hinaus können über den Flexodruck größere Pigmente

<sup>7</sup> Eine Bänderwalze verfügt über Zonen mit unterschiedlichem Schöpfvolumen, bestimmt durch die Rasterfeinheit und die Näpfchengeometrie [DFT99].

verdrückt und höhere Farbschichtdicken (ca. 0,8 µm bis 2,5 µm) als im Offsetdruck erzielt werden [PFA07a].

Weitere Informationen zum Offsetdruck können der einschlägigen Literatur [KIP00], [TES97] und [RIE89] entnommen werden. Als weiterführende Literatur zur Thematik des Flexodrucks wird auf das Buch „Technik des Flexodrucks“ [DFT06] verwiesen.

## 2.2 Klassifizierung von Interferenzeffektpigmenten

In der Darstellung der Druckverfahren wurde bereits auf die Pigmentklasse der „Speziellen Effektpigmente“ hingewiesen. Das folgende Kapitel dient zur Beschreibung von Interferenzeffektpigmenten. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf den Aufbau und die Farbwirkung der Interferenzeffektpigmente eingegangen und eine Einordnung der Interferenzpigmente der ersten Generation in die Pigmentklasse der speziellen Effektpigmente vorgenommen.

Alle „Speziellen Effektpigmente“ zeichnen sich durch einen hohen Glanz, Brillanz und irisierenden Farbeffekt, basierend auf optisch dünnen Filmen, aus. Der visuelle Eindruck entsteht durch Reflexion und Ablenkung des Lichtes an dünnen Einfach- oder Mehrschichtschichten. Nach Pfaff [PFA07a] werden die zur Klasse der „Speziellen Effektpigmenten“ gehörigen Effektpigmente wie folgt definiert: „Perlglanzpigmente als auch transparente und nichttransparente Interferenzeffektpigmente, die je nach ihrer Zusammensetzung und Struktur im Anwendungsmedium zu perlglänzenden oder nicht perlglänzenden Effekten in Kombination mit Interferenzphänomenen führen“. Diese Einteilung wurde aufgrund der Entwicklungen der letzten zehn bis fünfzehn Jahre notwendig. In diesem Zeitraum wurden neben den bis dahin bekannten und später als „erste Generation“ bezeichneten transparenten Perlglanz- und Interferenzeffektpigmenten auf Glimmerbasis, neue Effektpigmente unterschiedlichen Aufbaus und Herstellungsprozesses entwickelt. Es handelt sich dabei um beschichtete Siliziumdioxid- oder Aluminiumoxidplättchen, ultradünne Mehrschichtfilmplättchen oder um Flüssigkristalle in organisch vernetzten Polymeren [CRA01a]. Tabelle 2-2 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Effektpigmente, ihre Handelsnamen und Hersteller sowie ihre Unterscheidungsmerkmale.

Die Einteilung in Interferenzeffektpigmente der ersten oder der zweiten Generation erfolgt in Abhängigkeit der Historie bei der Entwicklung von Effektpigmenten. So wurden die ersten Effektpigmente, die einen Perlglanzeffekt aufzeigen bzw. nachstellen in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Die Effektpigmente der nachfolgenden Generation (Entwicklungen seit 1996) setzen nicht mehr auf die Nachstellung des Perlglanzes, sondern vielmehr auf die Optimierung des Farbeffektes aus der Interferenz und einem winkelabhängigen Farbwechsel bzw. auf die Erzielung eines größeren Glitzereffektes in Kombination mit einem Farbeffekt [CRA01a].

Aufgrund des seidigen, perlenähnlichen Glanzes werden sowohl im Druck, als auch im Automobilbereich heute vorwiegend Interferenzeffektpigmente der ersten Generation, also glimmerbasierte Perlglanz- und Interferenzeffektpigmente eingesetzt [PFA07a]. Darüber hinaus ist es angesichts der im Vergleich zu den anderen Verfahren kleinen Pigmentgröße, bisher nicht gelungen für den Offsetdruck Effektpigmente der zweiten Generation herzustellen.

Im Folgenden werden mit dem Begriff „Interferenzeffektfarben“ Druckfarben, in denen Perlglanz- bzw. Interferenzeffektpigmente der ersten Generation eingesetzt werden, bezeichnet. Auf die zusätzliche Kennzeichnung „der ersten Generation“ wird im Weiteren verzichtet.

*Tabelle 2-2: Einteilung und Funktionsweise der Interferenzeffektfarben der ersten und zweiten Generation (in Anlehnung an [CRA01a] und [PFA07a]).*

	Pigmentaufbau	visueller Eindruck	Handelsname	Hersteller
<b>1. Generation:</b>				
Perlglanzpigmente	Glimmerplättchen als Trägermaterial, das von einer oder mehreren dünnen Metalloxid-	Nachstellung des Glanzes natürlicher Perlen Perlglanz = "Glanz aus der Tiefe"; Bei größerer Schichtdicke des Metalloxids treten Interferenzeffekte/ Interferenzfarben hinzu. [MAI91]	"Iridin"/ "Afflair" "Phoenix"	Merck Eckart
Interferenzpigmente	schichten (TiO <sub>2</sub> , Eisen(III)oxid) ummantelt ist.			
<b>2. Generation</b>				
Interferenzpigmente	Mit Metalloxiden (TiO <sub>2</sub> , Eisen(III)oxid) beschichtete transparente Siliziumdioxidplättchen	Aufgrund einheitlicher Schichtdicken der Plättchen werden reinere Interferenzfarben neben einem höheren Glanz erreicht. Hohe Farbstärke und ausgeprägter winkelabhängiger Farbwechsel Multicoloreffekt. [PFA07a]	"Colorstream"	Merck
	Mit Metalloxiden (TiO <sub>2</sub> , Eisen(III)oxid) beschichtete Aluminiumoxidplättchen	Außergewöhnlich stark reflektierende Effektpigmente mit einem besonders intensiven Glitzereffekt/Sparkling-Effekt [CZO00]	"Xirallie" (High Chroma Chrystal Effect Pigments)	Merck
	Opake Mehrschichtfilmpigmente mit Fabry-Perot-Struktur, hergestellt über das PVD-Verfahren	Bereiche des sichtbaren Spektrums werden stark reflektiert, während dazu benachbarte Wellenlängenbereiche nur geringe Reflexion erfahren. Stark winkelabhängige gesättigte Farbeffekte. [PFA07a]	"Chromaflair"	JDSU (Flex)
	Effektpigmente auf Basis von Flüssigkristall-Polymeren. Helixartiger Schichtaufbau von hoch vernetzten flüssigkristallinen Strukturen organischer Moleküle.	Pigmente sind transparent und entfalten auf farbigen Untergründen ihre stark winkelabhängigen Effekte (Regenbogenfarben). Auf weißem Untergrund ist lediglich ein perlmuttartiges Schimmern zu sehen. Darüber hinaus sind cholesterische Materialien temperatursensitiv und zeigen thermochrome Effekte. [MEY98]	"Helicone"	Wacker

### 2.3 Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten

Licht, dass in eine Vorzugsrichtung reflektiert und als Glanz bezeichnet wird, ist wesentliche Voraussetzung für das Phänomen der irisierenden Farben. Hierbei unterscheidet das Auge feinste Nuancen, von Schimmern bis zu Funkeln oder Glitzern. Dabei scheint der Glanz echter Perlen gegenüber dem einfachen Spiegelglanz<sup>8</sup> mehrdimensional zu sein und aus der Tiefe des Objektes zu kommen. Diesen Glanz versuchen Perlglanz- bzw. Interferenzeffektpigmente der ersten Generation nachzuahmen [BÄU73b].

Der Effekt "Glanz aus der Tiefe" wird in der Literatur, z. B. in [BÄU73a], [KNO06] und [PFA07a], durch die Vielfachreflexion zwischen  $k$  parallelen transparenten Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex erklärt. Hierbei folgt die Reflexion den Gesetzmäßigkeiten der Reflexion an ebenen, nichtmetallischen Oberflächen. Diese lässt sich durch die Fresnel'schen Gleichungen angeben (siehe z. B. [BER04], [DEM04]). In Gleichung (2.1) ist die aus den Fresnel'schen Gleichungen resultierende Berechnungsvorschrift des Reflexionsgrades<sup>9</sup>  $R(\varepsilon_I)$  für unpolarisiertes Licht angeben [SCH02b]. Hierbei wurde die Winkelbezeichnung entsprechend Abbildung 2-8 a) gewählt. Für die Größe des Reflexionsgrades  $R(\varepsilon_I)$  ist der Unterschied der Brechzahlen entscheidend. Für die vereinfachte Annahme eines nahezu senkrechten Lichteinfalls ( $\varepsilon_I < 30^\circ$ ) lässt sich der Reflexionsgrad  $R(\varepsilon_I)$  nach Gleichung (2.2) berechnen. Hieraus folgt beispielsweise für die Oberflächenreflexion an Wasser ein Reflexionsgrad von 2 %. Für einen Lack ergibt sich ein Reflexionsgrad von 4 % und für Titandioxid in Rutil-Modifikation von 21 % [PFA07a].

$$R(\varepsilon_I) = \frac{1}{2} \cdot [R_{\parallel} + R_{\perp}] = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\tan^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\tan^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} + \frac{\sin^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\sin^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} \right] \quad (2.1)$$

Vereinfachend gilt für Einstrahlwinkel  $\varepsilon_I < 30^\circ$ :

<sup>8</sup> Unter Spiegelglanz wird die rein reguläre Reflexion verstanden. Sie ist nicht auf polierte Metalloberflächen beschränkt sondern kann auch an ebenen Grenzflächen transparenter Stoffe auftreten [PFA07a].

<sup>9</sup> Der Reflexionsgrad  $R(\varepsilon)$  ist als das Verhältnis zwischen der reflektierten zur einfallenden Leistung definiert.

$R(\varepsilon_I) = \frac{I_{ref}(\varepsilon_I)}{I_{ein}(\varepsilon_I)} = r^2(\varepsilon_I)$ , wobei  $r(\varepsilon_I)$  den Reflexionskoeffizienten bezeichnet.

$$R(\varepsilon_1) = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2.2)$$

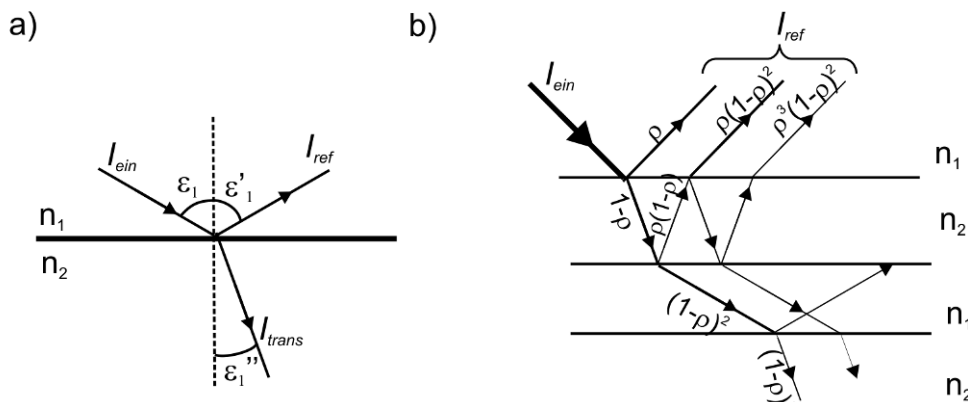


Abbildung 2-8: a) Reflexion und Brechung eines unter dem Einstrahlwinkel  $\varepsilon$  auf eine Grenzfläche auftreffenden Lichtstrahls [BER04]; b) schematische Darstellung der relativen Intensitätsverteilung bei Vielfachreflexion an transparenten Schichten [BÄU73a].

Üblicherweise wird somit nur ein Bruchteil des auf die Grenzfläche auftreffenden Lichtes reflektiert, während der Hauptanteil in das andere Medium eintritt. Setzt das Licht seinen Weg in einem völlig klaren und farblosen Medium fort und trifft auf weitere Grenzflächen, so wiederholt sich der Vorgang. Die Wiederholung erfolgt jedoch mit abgeschwächter Lichtintensität. Abbildung 2-8 b) zeigt diesen Vorgang in schematischer Darstellung. Der Perlglanzeffekt (Glanz aus der Tiefe) beruht nun darauf, dass ein scharf begrenzt auftreffender Lichtstrahl zwar entsprechend dem Reflexionsgesetz reflektiert wird, aber zugleich durch die Vielfachreflexion ein diffuser Eindruck entsteht, der sich in einer allmählich abnehmenden Helligkeit ausdrückt [PFA07a].

Der zweite Effekt, der sich durch Interferenzeffektpigmente erzielen lässt, ist der Wechsel ihrer Farbwirkung in Abhängigkeit des Beleuchtungs- und des Beobachtungswinkels. Dieser beruht auf der Interferenz dünner Schichten. Für das Auftreten von Interferenzen ist neben der Reflexion an den Grenzflächen die optische Weglänge<sup>10</sup> ( $n \cdot d_{\text{TiO}_2}$ ), die ein Lichtstrahl innerhalb des Materials zurücklegen muss, entscheidend. Im Zuge der Reflexion an der Grenzfläche von einem optisch dünneren zu einem optisch dichten Medium kommt es zu einer Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ). An Grenzflächen zu

<sup>10</sup> Die optische Weglänge bezeichnet das Produkt aus geometrischem Weg und Brechungsindex.



Stoffen mit niedrigerem Brechungsindex tritt hingegen kein Phasensprung auf. Zur Veranschaulichung erfolgt die vereinfachende Vorstellung des Lichtes als Sinusschwingung in einer Zweistrahlint interferenz, wie in Abbildung 2-9 gezeigt. Dabei ergibt sich eine minimale Reflexion, also destruktive Interferenz, wenn folgende Bedingung (2.3) erfüllt ist:

$$2d_{\text{TiO}_2} \cdot n_2 = \lambda \cdot x \quad \text{mit } x = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

Für eine Verstärkung, also die konstruktive Interferenz, muss hingegen Bedingung (2.4) erfüllt sein.

$$2d_{\text{TiO}_2} \cdot n_2 = (2x + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit } x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

Vereinfachend wurden beide Bedingungen für nahezu senkrechten Lichteinfall ( $\varepsilon_I < 30^\circ$ ) angegeben.

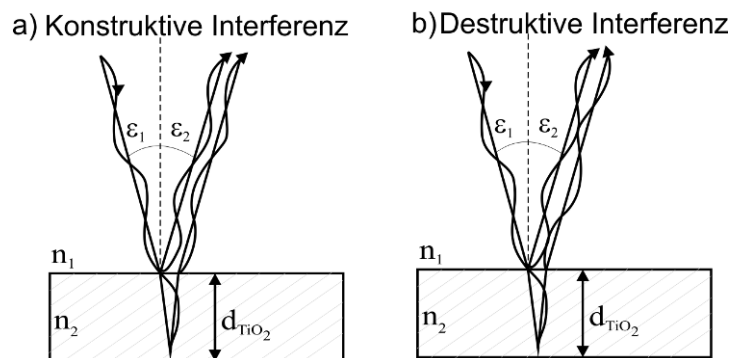


Abbildung 2-9: Schema der Interferenzentstehung durch a) Verstärkung (konstruktive Interferenz) und b) Auslöschung (destruktive Interferenz) verschiedener Wellenlängen des Lichtes an dünnen, optisch wirksamen Schichten [HOF87] am vereinfachten Beispiel eines Einstrahlwinkels  $\varepsilon_I < 30^\circ$

Da die Gleichungen (2.3) und (2.4) immer nur für eine bestimmte Wellenlänge oder Vielfache davon erfüllt sein können, wird jeweils ein Teil des sichtbaren Spektrums abgeschwächt oder gelöscht, während ein anderer Teil optimal reflektiert wird.

Das Reflexionsmaximum verschiebt sich mit wachsender optischer Weglänge zu größeren Wellenlängen. Daher kann gezielt mit einer Variation der Beschichtungsdicke des Titandioxids  $d_{\text{TiO}_2}$  unter Beibehaltung des Brechungsindex  $n_2$  die optische Weglänge und somit die Interferenzeffektfarbe der Pigmente verändert werden [BÄU73a].

Ein weiteres Charakteristikum der Interferenz ist, dass die Farben mit dem Einstrahlwinkel des Lichtes wechseln. [BÄU73a] gibt eine Gleichung für die

Berechnung der Wellenlänge maximaler Reflexion für beliebige Einstrahlwinkel für dünne Schichten an, siehe Gl. (2.5).

$$\lambda_{\max} = \frac{4d_{\text{TiO}_2}}{2x-1} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varepsilon_1} \quad x=1,2,3 \quad (2.5)$$

Aus dieser Beziehung folgt, dass sich mit einem größer werdenden Einstrahlwinkel  $\varepsilon_1$  die Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  zu kleineren Wellenlängen verschiebt.

Bei Perlglanz-/Interferenzeffektpigmenten der ersten Generation werden die dargestellten physikalischen Prinzipien durch die Beschichtung eines plättchenförmigen Glimmerpigments mit Titandioxid realisiert, siehe Abbildung 2-10. Dabei hat Glimmer in etwa den gleichen Brechungsindex wie das Umgebungsmedium (Lack bzw. Druckfarbe)  $n_{\text{Glimmer}} \approx n_{\text{Lack}} = 1,6$ . Titandioxid wird meist in der Rutil-Modifikation verwendet und verfügt über einen sehr viel größeren Brechungsindex  $n_{\text{TiO}_2, \text{Rutil}} = 2,7$ . Hieraus ergeben sich Schichten unterschiedlicher Reflexions- und Brechungseigenschaften, die letztendlich in Abhängigkeit der aufgetragenen Beschichtungsdicke des  $\text{TiO}_2$  zu einem Perlglanz oder zu Interferenzeffekt führen [PFA02].

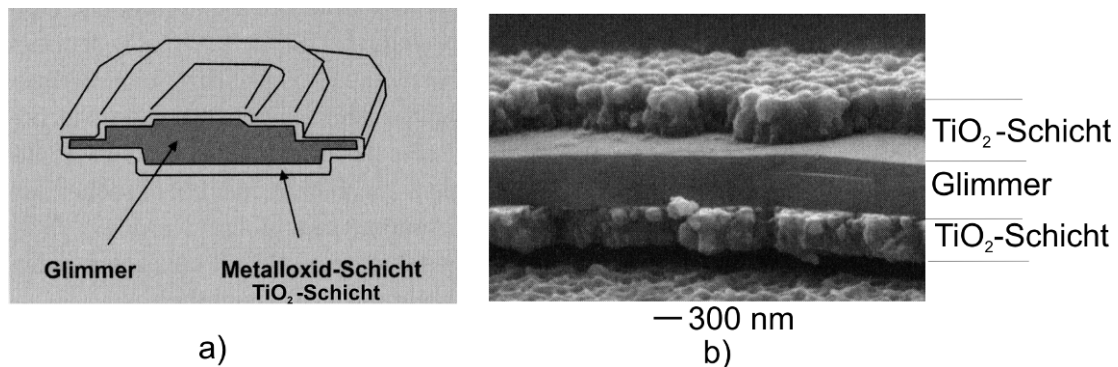


Abbildung 2-10: a) Schematischer Aufbau eines Effektpigments auf Basis von Glimmer [PFA07a]; b) REM-Aufnahme eines  $\text{TiO}_2$ -Glimmerpigments. Seitenansicht eines gebrochenen Pigmentteilchens. Schichtaufbau:  $\text{TiO}_2$ , Muskovit-Glimmer,  $\text{TiO}_2$  [PFA07a].

Abbildung 2-11 zeigt, wie die Beschichtungsdicke des  $\text{TiO}_2$  die Interferenzeffektfarbe bestimmt. Je nach Beschichtungsdicke des Titandioxids  $d_{\text{TiO}_2}$  ergeben sich Farben von Perlweiß über Gelb, Rot, Blau nach Grün.

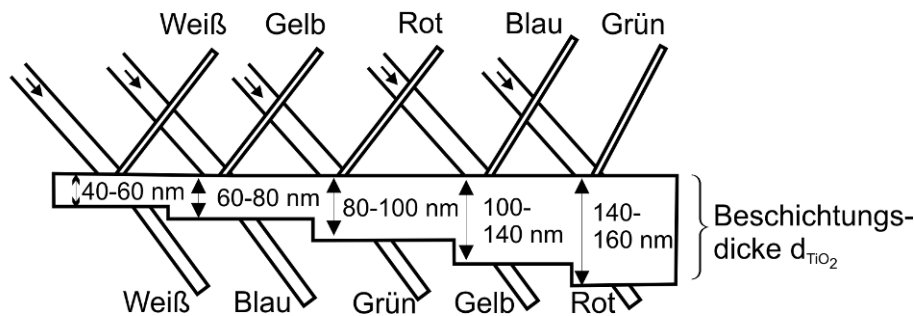
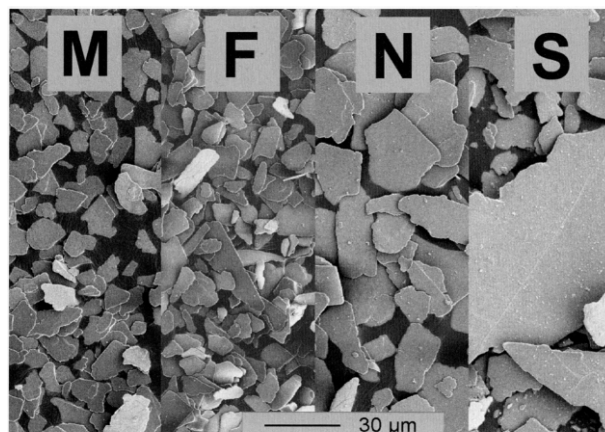


Abbildung 2-11: Die Schichtdicke des Titandioxids bestimmt die Interferenzeffektfarbe (in Anlehnung an [MAI91])

Nach Aussagen von Pfaff im Rahmen der Vorlesung „Anorganische Pigmente“ wird für die Beschichtungen von Glimmerpigmenten mit Titanoxid eine Genauigkeit von  $\pm 5$  nm erreicht [PFA07b].

Die Gesamtdicke und die Teilchengröße von Interferenzeffektpigmenten ergibt sich in Abhängigkeit der Glimmerblättchen. Hierbei werden die Glimmerblättchen der in Abbildung 2-12 dargestellten Teilchengrößenverteilung zugeordnet.



M:	< 15 µm	Dicke: 300 - 600 µm
F:	5 - 20 µm	
N:	10 - 50 µm	
S:	10 - 130 µm	

Abbildung 2-12: Teilchengrößenverteilung der Glimmerblättchen [PFA07a]

Die Teilchengröße der Effektpigmente nach der Beschichtung mit Titandioxid bestimmt das Deckvermögen und den erzielbaren Effekt: Je feiner die Teilchen sind, umso mehr Licht wird an den Ecken und Kanten gestreut. Der Glanz wird verringert, das Deckvermögen nimmt zu. Nach einer Beschichtung mit Titandioxid werden nachfolgende Fraktionen zusammengefasst:

- 5 - 25  $\mu\text{m}$   
(seidenglänzend, typische Teilchengrößen für Offsetdruckfarben)
- 10 – 50  $\mu\text{m}$   
(brillanter Glanz, typische Teilchengrößen für Flexodruck- und Tiefdruckfarben)
- 30 – 150  $\mu\text{m}$   
(glitzernder Glanz, typische Teilchengrößen für Flexodruck- und Tiefdruckfarben)

Ein typisches Perlglanz-/Interferenzpigment besteht aus ca. 70 % Glimmer und hat eine Dichte  $\rho_{\text{Pigment}} \approx 3 \text{ g/cm}^3$  [MAI91].

Perlglanz-/Interferenzeffektpigmente zeigen einen sichtbaren Farbflop (changierender Effekt, Flip-Flop-Effekt) in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels. Nur in einem bestimmten Winkel, dem Glanzwinkel<sup>11</sup>, kommt die Interferenzeffektfarbe richtig zur Wirkung. In diesem Winkel überstrahlt die Interferenzeffektfarbe die durch den Untergrund hervorgerufene Reflexion. Welche Farbe aus den anderen Betrachtungswinkeln wahrgenommen wird, ist aufgrund ihrer Transparenz vom Untergrund auf den sie aufgebracht wird abhängig. In [CRA01a] wurde darauf verwiesen, dass bei einer Interferenzeffektfarbe (aufgetragen auf einen weißen Untergrund) ab einem Differenzwinkel<sup>12</sup> von  $30^\circ$  die von der Reflexion des Untergrundweiß überlagerte Transmissionsfarbe wahrgenommen wird. Auf einem schwarzen Untergrund wird hingegen das gesamte transmittierte Licht absorbiert, die Fläche sollte also komplett schwarz erscheinen. Da an den Ecken und Kanten der Pigmente jedoch Licht gestreut wird, erscheint die Fläche, auch unter Beobachtungswinkeln mit einem Differenzwinkel größer  $30^\circ$ , in einem leicht bläulichen Schimmer [HOF89].

---

<sup>11</sup> Als Glanzwinkel (auch Reflexionswinkel) wird der Winkel der regulären Reflexion (Reflexionswinkel ist gleich dem Einstrahlwinkel) bezeichnet.

<sup>12</sup> Der Differenzwinkel ergibt sich aus dem Winkel der Beobachtungsposition zum Glanzwinkel  $\xi$ .

## 2.4 Farb- und Dichtemessung

Einen Hauptbestandteil der Prozess- und Qualitätskontrolle stellen in Hinblick auf die Bewertung der Farbwirkung die Farbmessung und die Dichtemessung (Densitometrie) dar. In diesem Kapitel werden einleitend die Begriffe Remission, Reflexion, optische Dichte und Glanz erläutert. Darauf aufbauend erfolgt in einem zweiten Abschnitt eine Einführung in die Grundlagen der Farbmetriek. Die beiden folgenden Abschnitte dienen der Darstellung des Messprinzips der Dichte- und der Farbmessung. In Bezug auf die Farbmessung wird dabei sowohl auf die Anforderungen der Druckindustrie als auch die der Farbmessung von Interferenzeffektfarben eingegangen.

### 2.4.1 Remission, Reflexion, optische Dichte und Glanz

Das optische Erscheinungsbild einer Druckfarbschicht, insbesondere in Hinblick auf ihre Helligkeit und Farbsättigung, hängt entscheidend von der Dicke der gedruckten Farbschicht ab. Je dicker die Farbschichten sind, desto satter und dunkler erscheint ihre Farbe. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erläutert, kann der lasierende Charakter der Druckfarben vereinfacht mit der Wirkung eines Farbfilters beschrieben werden, wobei im Falle des Druckens immer die Remission bzw. Reflexion des Untergrundes, also des unbedruckten Bedruckstoffs (Remissionsgrad  $\beta_{\text{Bedruck}}$ ), mit in die Überlegungen einbezogen werden muss (Abbildung 2-13).

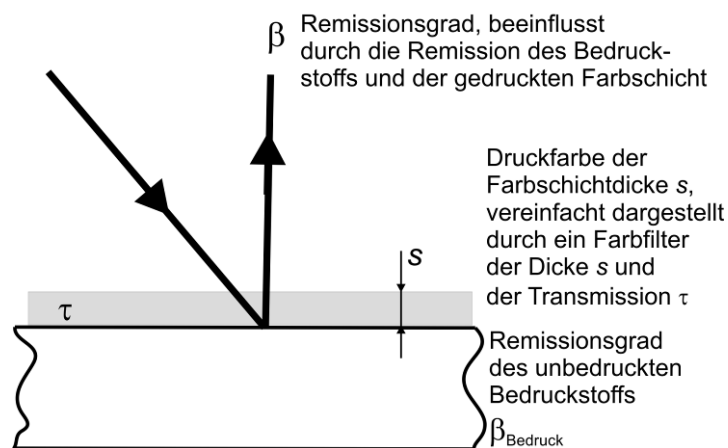


Abbildung 2-13: Modellvorstellung zur Beschreibung des Einflusses einer gedruckten Farbschicht auf den resultierenden Remissionsgrad  $\beta$

Der Remissionsgrad  $\beta$  stellt einen Zusammenhang zwischen der von einer Oberfläche zurückgeworfenen Strahlung und dem auf diese Oberfläche eingestrahlten Licht her [LOO89]. Beim Remissionsgrad wird die Leuchtdichte der Probe  $L_{Probe}$  im Verhältnis zur Leuchtdichte eines Lambert-Reflektors (absolut weißer Körper)  $L_{weiß}$  beurteilt, Gl. (2.6).

$$\beta = \frac{\text{Leuchtdichte der Probe}}{\text{Leuchtdichte eines absolut weißen Körpers}} = \frac{L_{Probe}}{L_{weiß}} \quad (2.6)$$

Im Gegensatz dazu wird beim Reflexionsgrad  $\rho$  der von einer Oberfläche reflektierte Lichtstrom  $\phi_{ref}$  zum auffallenden Lichtstrom  $\phi_{ein}$  erfasst, Gl. (2.7).

$$\rho = \frac{\text{reflektierter Lichtstrom}}{\text{eingestrahelter Lichtstrom}} = \frac{\Phi_{ref}}{\Phi_{ein}} \quad (2.7)$$

Beide Größen, Reflexionsgrad  $\rho$  und Remissionsgrad  $\beta$ , lassen sich sowohl global über den gesamten visuellen Bereich des Lichtspektrums als auch spektral (spektraler Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  und spektraler Remissionsgrad  $\beta(\lambda)$ ) angeben [RIC81]. Im Fall der spektralen Größen wird die Reflexion bzw. Remission für kleine Wellenlängenbereiche  $\Delta\lambda$  ermittelt und meist als Reflexions-  $\rho(\lambda)$  bzw. Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  dargestellt (Abbildung 2-14 a).

Aus dem Remissionsgrad  $\beta$  bzw. der Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  lässt sich die optische Dichte gemäß Gl. (2.8) ableiten. Sie wird aus dem negativen Logarithmus des Remissionsgrades ermittelt [OTT82].

$$\text{Dichte:} \quad D = \lg \frac{1}{\beta} = -\lg \beta \quad (2.8)$$

$$\text{Dichtekurve: } D(\lambda) = -\lg \beta(\lambda)$$

Im Falle der global ermittelten Remission  $\beta$  wird im Folgenden immer von der Dichte  $D$  gesprochen. Wird die Dichte aus den spektralen Remissionsgraden ermittelt, ergibt sich die Dichtekurve  $D(\lambda)$ , siehe Abbildung 2-14 b).

Aus der Dichtekurve lässt sich des Weiteren die Messgröße der spektralen Dichte  $D_\lambda$  nach Gleichung (2.9) ableiten.

$$D_\lambda = \max[D(\lambda)] \quad (2.9)$$

Sie stellt den Maximalwert der Dichtekurve und somit den Minimalwert der Remissionskurve dar und wird immer im Zusammenhang mit der ihr zugehörigen Wellenlänge  $\lambda$  angegeben (Abbildung 2-14 b).

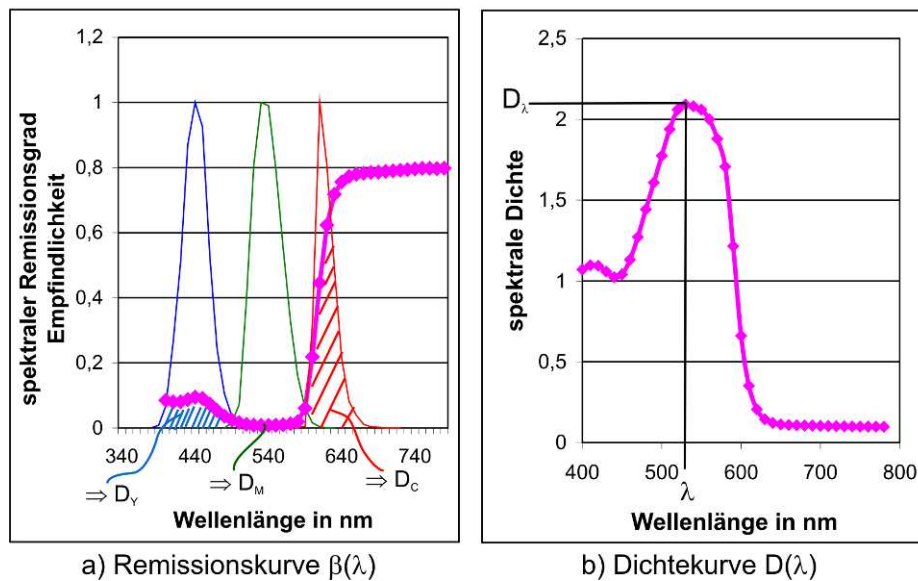


Abbildung 2-14: a) Darstellung der Remissionskurve und der relativen Empfindlichkeiten des Empfängersystems (Densitometers) für die Skalenfarben Cyan (C), Magenta (M) und Yellow (Y) zur Berechnung der Dichte [DIN 16536]; b) Aus der Remissionskurve errechnete Dichtekurve und daraus abgeleiteter Messwert der spektralen Dichte  $D_\lambda$  für die Wellenlänge  $\lambda$  [TEC06].

In Abbildung 2-14 a) sind neben der Remissionskurve die relativen Empfindlichkeiten des Empfängersystems für die Skalenfarben Cyan (C), Magenta (M) und Yellow (Y), wie sie durch DIN 16536 vorgegeben werden, eingetragen. In die Berechnung der Dichte (Gleichung (2.10)) muss, neben der gemessenen Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  und den Empfindlichkeiten des Empfängersystems  $s(\lambda)$ , die spektrale Verteilungsfunktion der Normlichtart A ( $S_A(\lambda)$ : Farbtemperatur  $T_f = 2856$  K) berücksichtigt werden.

$$D = -\lg \frac{\int \beta(\lambda) \cdot S_A(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_A(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.10)$$

Neben der Farbwirkung einer gedruckten Farbschicht und der optischen Dichte muss als weitere Größe der Glanz betrachtet werden. Dieser wird maßgeblich durch das Reflexionsvermögen der gedruckten Farbschicht beeinflusst.

Der von einer Oberfläche ausgehende Farbreiz ist im Wesentlichen von den Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Oberfläche und der spektralen Zusammensetzung des sie bestrahlenden Lichtes abhängig. Die Rückstrahlung kann dabei „glänzend“ oder „matt“ erfolgen. Von Glanz wird gesprochen, wenn gerichtet auffallendes Licht nach dem Reflexionsgesetz gerichtet reflektiert wird. Als „matt“ wird eine Oberfläche bezeichnet, die gerichtet auffallendes

Licht unabhängig von der Beleuchtungsrichtung in alle Richtungen verteilt, also diffus, reflektiert. Glatte Oberflächen zeigen ein hohes Reflexionsvermögen in einer Vorzugsrichtung und daher einen hohen Glanz. An rauen Oberflächen wird das Licht in unterschiedliche Raumrichtungen reflektiert, was zu einem matten Eindruck führt [BER04].

Das Glanzverhalten einer Oberfläche wird durch eine Indikatrix<sup>13</sup> (Abbildung 2-15) beschrieben, die sich mit dem Einstrahlwinkel  $\varepsilon_i$  und der Oberflächenbeschaffenheit der Probe verändert.

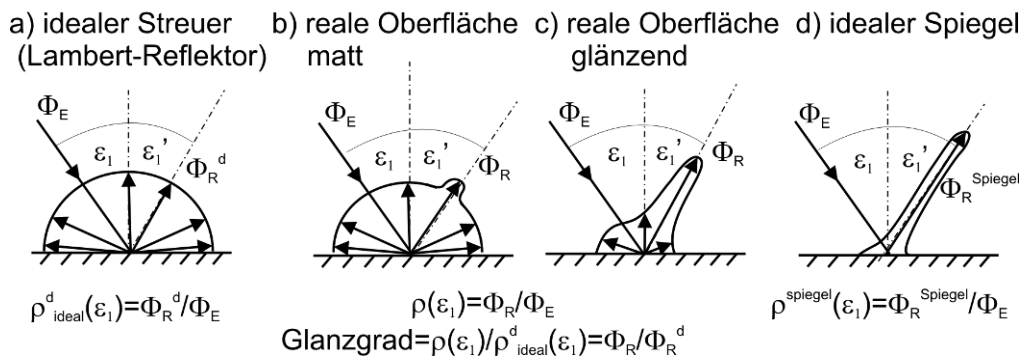


Abbildung 2-15: Reflexions-/Glanzindikatrix unterschiedlicher Oberflächen.

a) vollkommen matt: ausschließlich diffuse Reflexion; b) matt: diffuse Reflexion dominierend, geringe gerichtete Reflexion; c) glänzend: überwiegend gerichtete Reflexion, geringer Anteil diffuser Reflexion; d) ideal spiegelnd (hochglänzend): nahezu ausschließliche gerichtete Reflexion (in Anlehnung an [PFA07a])

Für den visuellen Eindruck des Glanzes ist der Maximalwert der gemessenen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels entscheidend. Dieser tritt immer im sogenannten Glanzwinkel  $\xi$  auf. Der Glanzwinkel  $\xi$  entspricht dabei dem Winkel, der sich aus dem Reflexionsgesetz ergibt (Einstrahlwinkel gleich Reflexionswinkel):

$$\text{Glanzwinkel:} \quad \xi = \varepsilon'_i = \varepsilon_i \quad (2.11)$$

Neben der Oberflächenrauigkeit hat der Einstrahlwinkel  $\varepsilon_i$  Einfluss auf die Stärke des Glanzeindrucks. Mit größer werdendem Einstrahlwinkel (flachere Einstrahlung in Bezug auf die Probenhorizontale) nimmt der Glanzeindruck auch bei sehr rauen Oberflächen zu [DIN EN ISO 8254-2].

<sup>13</sup> Die Indikatrix gibt die winkelabhängige Intensitätsverteilung des an der Oberfläche reflektierten Lichtes wieder. Aus der Form der einhüllenden Kurve lassen sich die diffusen und gerichteten Reflexionsanteile erkennen [KLE04].



Neben der Beschreibung des Glanzes durch Begriffe wie „glänzend“ und „matt“ kann der Glanz durch die Messgröße „Glanzgrad“ angegeben werden. Pfaff [PFA07a] definiert den Glanzgrad als das Verhältnis des Reflexionsgrades der Oberfläche  $\rho(\varepsilon'_1)$  zum Reflexionsgrad einer ideal diffus reflektierenden Oberfläche  $\rho_{ideal}^d(\varepsilon'_1)$  bei einer Betrachtung im Glanzwinkel  $\xi$ .

$$\text{Glanzgrad} = \frac{\rho(\varepsilon'_1)}{\rho_{ideal}^d(\varepsilon'_1)} \quad \text{für } \xi = \varepsilon'_1 = -\varepsilon_1 \quad (2.12)$$

## 2.4.2 Grundlagen der Farbmimetrik

Die Farbmimetrik basiert auf den Eigenschaften des visuellen Sehens und den Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung<sup>14</sup>. Sie befasst sich mit der quantitativen Kennzeichnung von Farbeindrücken durch die eindeutige Beschreibung einer Farbwirkung durch Maß und Zahl [RIC81]. Dabei wird der Begriff „Farbe“ einer Sinnesempfindung zugeordnet. DIN 5033-1 gibt hierzu folgende Definition: „Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teil des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einer einäugigen Betrachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlos angrenzenden Bezirk allein unterscheidet.“ [DIN 5033].

Abbildung 2-16 beschreibt anschaulich die Vorgänge der Sinneswahrnehmung „Farbe“. Voraussetzung für die Sinneswahrnehmung „Farbe“ ist der Farbeiz. Hierbei entspricht der Farbeiz derjenigen Strahlung, die in das Auge eines Betrachters fällt, dort die Anregung der Sinneszellen auslöst und damit Anlass für eine Farbeempfindung gibt. Der Farbeiz kann direkt durch die Strahlung einer Lichtquelle oder durch eine transformierte Strahlung, beispielsweise in Folge einer an einem Körper reflektierten Strahlung, hervorgerufen werden.

---

<sup>14</sup> Bei einer additiven Farbmischung nimmt das Auge unterschiedliche Farbeize gleichzeitig oder unter einem so kleinen Gesichtswinkel bzw. in schneller Abfolge wahr, dass eine Auflösung der einzelnen Reize für das Auge nicht mehr möglich ist. Die Strahlung wird überlagert und addiert sich zu einem Gesamtfarbeindruck. Der Helligkeitseindruck nimmt bei der additiven Farbmischung zu. Als Sonderfall kann aus der additiven Farbmischung Weiß resultieren. (in Anlehnung an [IDD07]).

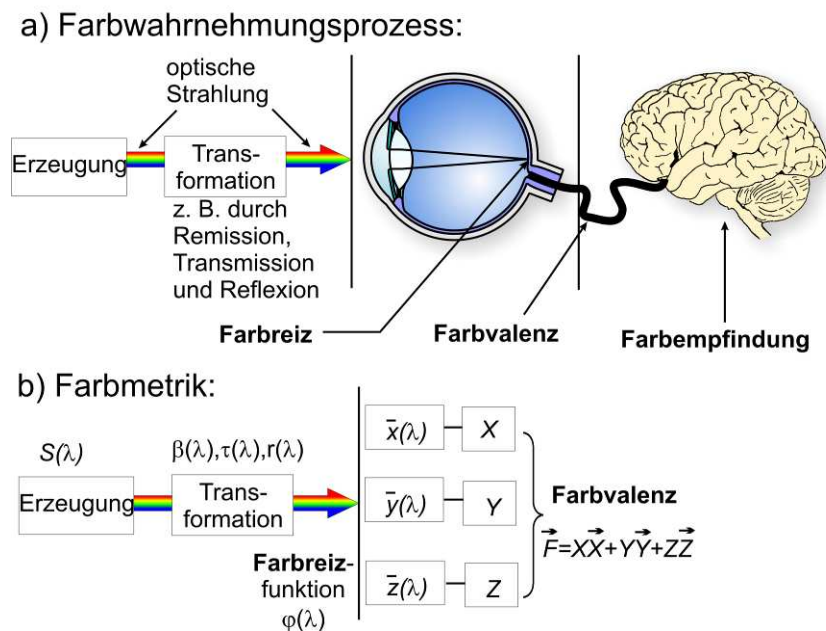


Abbildung 2-16: a) Farbwahrnehmungsprozess, gekennzeichnet durch einen Farbreiz infolge einer optischen Strahlung, der im Auge zu einer Farbvalenz und letztendlich im Gehirn zur Farbempfindung führt. b) Abbildung des Farbwahrnehmungsprozesses durch die Farbmatrik [in Anlehnung an [IDD07]]

Der Farbreiz wird im Auge durch die Fotorezeptoren, die Zapfen und die Stäbchen, in elektrische Signale umgewandelt. Dabei sind die Zapfen für das photopische Sehen (Tagessehen und Farbsehen) und die Stäbchen für das skotopische Sehen (Nachtsehen) zuständig. Es wird davon ausgegangen, dass in der Netzhaut drei unterschiedliche Zapfentypen (S-, M- und L-Zapfen) vorliegen, die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten aufweisen und somit den visuell sichtbaren Bereich des Lichtspektrums von 380 nm bis 780 nm abdecken.

Im Weiteren erfolgt eine Verschaltung und Informationsreduzierung, aus der die Farbvalenz<sup>15</sup> in Form von Rot-Grün-, Blau-Gelb- und Hell-Dunkel-Signalen hervorgeht. Im Gehirn findet eine weitere Verarbeitung statt, die letztendlich zur Farbempfindung führt (Abbildung 2-16a). Die Farbempfindung ist dabei von

<sup>15</sup> Die Farbvalenz ist die physiologische Vorstufe der Farbempfindung. Sie ist eindeutig charakterisiert durch die Erregungszustände der drei Zapfenarten. In der Farbmatrik beschreibt die Farbvalenz die Eigenschaft eines Farbreizes, der die Wirkung dieses Farbreizes durch die additive Farbmischung von drei Primärvalenzen beschreibt [RIC81].

Gefühlen und Erfahrungen jedes einzelnen Menschen beeinflusst. Aufgrund der bisher fehlenden Möglichkeiten zur Erfassung von Gefühlen und Erfahrungen beschränkt sich die Farbmatrik auf die Beschreibung der Farbvalenz. Die Beschreibung der Farbwirkung über die Farbvalenz ist in Abbildung 2-16 b) aufgeführt. Hierin wird der Farbreiz durch die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  beschrieben. Die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  kann dabei der spektralen Verteilung des Lichtes  $S(\lambda)$  entsprechen, wenn keine nachfolgende Transformation (Remission, Transmission oder Reflexion) erfolgt (Gleichung (2.13)).

$$\varphi(\lambda) \equiv S(\lambda) \quad (2.13)$$

Bei der Betrachtung von Körperfarben (Körper, Drucke, Filter, usw.) setzt sich die Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$ , entsprechend Gleichung (2.14), aus der spektralen Verteilung des Lichtes  $S(\lambda)$  und einem Transformationsanteil (Remission  $\beta(\lambda)$ , Transmission  $\tau(\lambda)$  oder Reflexion  $r(\lambda)$ ) zusammen.

$$\begin{aligned} \text{Remission:} \quad & \varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \text{ bzw.} \\ \text{Transmission:} \quad & \varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \text{ bzw.} \\ \text{Reflexion:} \quad & \varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot r(\lambda) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Die Umsetzung der Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  in die Farbvalenz durch die Farbmatrik beruht noch heute auf den Grundlagen, die 1931 durch die CIE auf Basis von Gleichheitsversuchen gelegt wurden.

Gleichheitsversuche basieren auf den Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung. Die additive Farbmischung besagt, dass sich jede Farbe durch die Überlagerung von drei Primärvalenzen<sup>16</sup> durch eine innere<sup>17</sup> oder eine äußere<sup>18</sup> Farbmischung nachstellen lässt. In Gleichheitsversuchen werden die drei Primärvalenzen in Form von Lichtfarben gegeben. Ihnen gegenüber wird

---

<sup>16</sup> „Als Primärvalenzen bezeichnet man die drei beliebig gewählten, dann aber festgehaltenen Farbvalenzen, aus denen sich durch innere oder äußere Farbmischung Farbgleichheiten zu allen anderen Farben herstellen lassen.“ Die drei beliebigen Farbvalenzen sind so zu wählen, dass sich keine der drei Farbvalenzen aus den anderen beiden durch eine additive Mischung erzielen lässt. Im mathematischen Sinne bedeutet dies lineare Unabhängigkeit. [RIC81]

<sup>17</sup> Für eine innere Farbmischung ist es für die Nachmischung einer vorgegebenen Farbe ausreichend die drei Primärfarben direkt zu überlagern. [RIC81]

<sup>18</sup> Als äußere Farbmischung wird diejenige Überlagerung der Primärvalenzen verstanden, bei der es notwendig ist zur vorgegebenen Farbe eine der Primärvalenzen zu überlagern, sodass zwischen der überlagerten Zielfarbe und der Überlagerung der Primärvalenzen Farbgleichheit erzielt werden kann.

meist eine Spektralfarbe gestellt. Ziel ist es nun, aus der Überlagerung der Lichtfarben diese Spektralfarbe zu ermischen. Aus der Gleichheit der gemischten und der vorgegebenen Farbe, lassen sich dann die Anteile der einzelnen Primärfarben an der additiven Farbmischung ablesen. Die vektorielle Addition der gemischten Farben lässt sich dabei durch die Farbgleichung (2.15) angeben:

$$\vec{F} = R\vec{R} + B\vec{B} + G\vec{G} = X\vec{X} + Y\vec{Y} + Z\vec{Z} \quad (2.15)$$

Hierin bedeuten  $R$ ,  $G$  und  $B$  bzw.  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  die aus dem Gleichheitsversuch ermittelten Anteile (Farbwerte) der Primärvalenzen an der additiven Farbmischung und  $\vec{R}$ ,  $\vec{G}$ ,  $\vec{B}$  bzw.  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$ ,  $\vec{Z}$  die Einheitsvektoren der Primärvalenzen des dreidimensionalen Farbraums.

Aus den Anteilen ergeben sich ferner in Abhängigkeit des Normbeobachters<sup>19</sup> die Normspektralwertkurven, die in Abbildung 2-17 für das CIEXYZ-Farbsystem<sup>20</sup> angegeben sind. In Abbildung 2-17 erfolgt die Kennzeichnung des Normbeobachters durch die tief gestellte Bezeichnung  $2^\circ$  bzw.  $10^\circ$ . Im CIEXYZ-Farbsystem wurden die Primärvalenzen so gewählt, dass die Normspektralwertkurven nur positive Werte enthalten und sich somit alle realen Farben über eine innere Farbmischung beschreiben lassen. Dies ermöglicht ein einfacheres Verständnis bezüglich der Bildung der Farbgleichung, auch wenn die Primärvalenzen des CIEXYZ-Farbsystems selbst virtuell sind (es sich also um nicht real darstellbare Farben handelt).

---

<sup>19</sup> Der Normbeobachter wurde von der CIE 1931 zunächst für einen Sehwinkel von  $2^\circ$  definiert. 1964 erfolgte die zusätzliche Definition des  $10^\circ$ -Normbeobachters (Sehwinkel:  $10^\circ$ ). Aufgrund des Aufbaus der Retina lassen sich Ergebnisse des Gleichheitsversuches, also die Normspektralwertkurven, der beiden Normbeobachter nicht mathematisch ineinander überführen [KLE04].

<sup>20</sup> Das CIEXYZ-Farbsystem stellt die Basis für alle weiteren genormten Farbsysteme der CIE dar. Es beruht auf einer Normierung eines Normbeobachters ( $2^\circ$  bzw.  $10^\circ$ ) und Normlichtarten (z. B. A, D65 und D50).

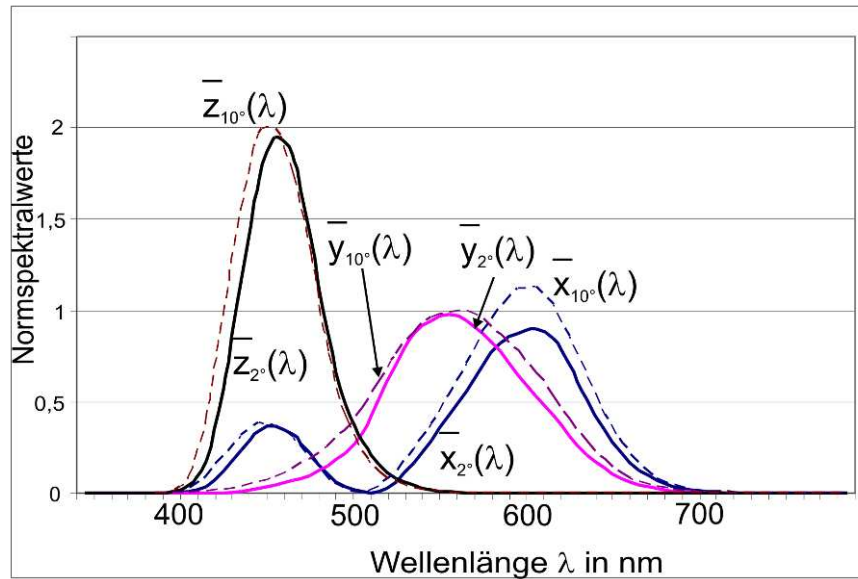


Abbildung 2-17: Darstellung der Normspektralwertkurven des 2°- und des 10°-Normbeobachters im CIEXYZ-Farbsystem (angelehnt an [WYS00])

Die Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  geben durch ihre Möglichkeit jeden monochromatischen Farbreiz direkt über die Farbgleichung (2.15) beschreiben zu können, einen Zusammenhang zwischen der Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  und der Farbvalenz  $\vec{F}$  an. Denn jeder Farbreiz kann als Summe einzelner lückenlos aneinander anschließender schmaler Spektralbänder  $\Delta\lambda$  verstanden werden und diese als additive Mischung der einzelnen Spektralbänder verstehen. Wird  $\Delta\lambda$  hinreichend eng gewählt, können die Normfarbwerte XYZ entsprechend Gleichung (2.16) errechnet werden.

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380nm}^{780nm} \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= \int_{380nm}^{780nm} \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= \int_{380nm}^{780nm} \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Durch die Berechnung der Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  ist es nun möglich in einem normierten Farbsystem, welches auf der ganzen Welt einheitlich verwendet wird, die Farbwirkung durch Maß und Zahl eindeutig zu beschreiben. Hierzu erfolgt die Verwendung der Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  unter Angabe des Normbeobachters und der Einsatz einer

Normlichtart<sup>21</sup> zur Ermittlung der Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$ , entsprechend Gleichung (2.14) für eine transformierte Strahlung.

Neben der Kennzeichnung einer Farbe durch Maß und Zahl ist in der Praxis die Angabe von empfindungsgemäßen Unterschieden zwischen zwei Farben notwendig. Da dies mit dem CIEXYZ-Farbsystem nicht möglich ist, befassen sich die Farbsysteme der höheren Farbmetrik mit der Berechnung empfindungsgemäß gleichabständiger Farbsysteme auf Basis der XYZ-Farbwerte [WYS00]. In der Druckindustrie wird bis heute lediglich das CIELAB-Farbsystem als Vertreter der Farbsysteme der höheren Farbmetrik eingesetzt. Aufgrund dessen beziehen sich alle folgenden Erläuterungen lediglich auf dieses Farbsystem. Erläuterungen zu anderen Farbsysteme der höheren Farbmetrik, wie z. B. DIN99 können der Literatur entnommen werden [KLE04].

Der CIELAB-Farbraum, der in Abbildung 2-18 dargestellt ist, wird von drei zueinander orthogonalen Achsen  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  aufgespannt. Entlang der  $L^*$ -Achse werden die unbunten Farben<sup>22</sup> mit Werten zwischen Schwarz  $L^*=0$  und Weiß  $L^*=100$  und somit die Helligkeit aufgetragen. In der  $a^*/b^*$ -Farbebene ergeben sich Farben gleicher Helligkeit. Durch  $a^*$  werden dabei die bunten Anteile in Richtung Grün-Rot und durch  $b^*$  die bunten Anteile in Richtung Blau-Gelb angegeben.

---

<sup>21</sup> Als Normlichtart wird zur Berechnung der Farbwerte im Druck meist D50 verwendet.

<sup>22</sup> Als unbunte Farben werden Farben, die einen Grauverlauf von Schwarz nach Weiß aufweisen, bezeichnet. Ihnen ist die Buntheit Null zugeordnet [PAU00].

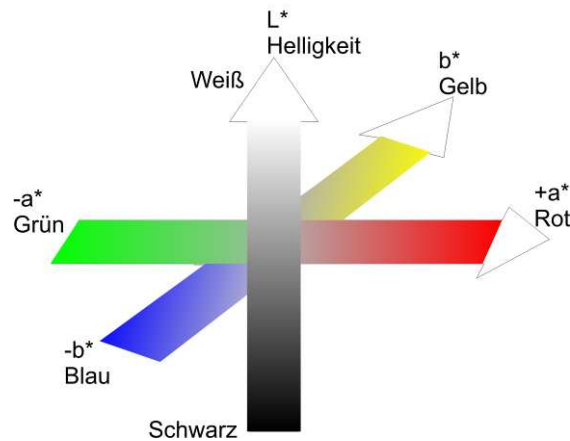


Abbildung 2-18: Prinzipdarstellung des CIELAB-Farbraums: Die drei Raumkoordinaten werden mit  $a^*$  (Grün-Rot-Achse),  $b^*$  (Blau-Gelb-Achse) und  $L^*$  (Helligkeitsachse) bezeichnet (in Anlehnung an [VÖL01])

Das CIELAB-Farbsystem ( $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ ) beruht auf einer nichtlinearen Transformation des XYZ-Farbraums, siehe Gl. (2.17).

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116 \cdot \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \cdot \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ b^* &= 200 \cdot \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{für } q_x = \frac{X}{X_n}, q_y = \frac{Y}{Y_n} \\ &\text{und } q_z = \frac{Z}{Z_n} > \frac{216}{24389} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Für Quotienten  $q_x$ ,  $q_y$  und  $q_z < \frac{216}{24389}$  erfolgt eine Berechnung entsprechend Gl. (2.18)

$$q^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{116} \cdot \left( \frac{24389}{216} \cdot q + 16 \right) \text{ mit } q := q_x, q_y \text{ bzw. } q_z \quad (2.18)$$

Mit  $X_n$ ,  $Y_n$  und  $Z_n$  werden in Gl. (2.17) die Farbwerte der Normlichtart angegeben. Für die in der Druckindustrie am häufigsten betrachtete Lichtart D50 ergeben sich für die Farbwerte:  $X_n=96,422$ ,  $Y_n=100$  und  $Z_n=82,521$  [DIN 5033].

Mit den CIELAB-Farbwerten  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  lässt sich der Farbabstand für einen Soll- und Ist-Wert errechnen. Durch ihn ist es möglich gleich empfundene

Farbunterschiede durch nahezu gleich lange Distanzen im Farbraum anzugeben. Der Farbabstand mit der Bezeichnung  $\Delta E_{ab}^*$  ergibt sich aus dem dreidimensionalen Pythagoras der Strecken  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  und  $\Delta b^*$  (Gl. (2.19)), welche sich aus der Differenz der Soll-Farbwerte zu den Ist-Farbwerten ergeben (Abbildung 2-19).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.19)$$

Hierin stehen die Abkürzungen  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  und  $\Delta b^*$  entsprechen Gl. (2.20) für die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert.

$$\Delta L^* = L_{Ist}^* - L_{Soll}^*, \Delta a^* = a_{Ist}^* - a_{Soll}^* \text{ und } \Delta b^* = b_{Ist}^* - b_{Soll}^* \quad (2.20)$$

Neben der Ermittlung des Farbabstands können die ermittelten Differenzen zur Beschreibung der Veränderung der Ist-Farbwerte gegenüber den Soll-Farbwerten genutzt werden. In diesem Zusammenhang steht  $\Delta L^* < 0$  für einen dunkleren und  $\Delta L^* > 0$  für einen helleren Farbeindruck. Für  $\Delta a^* < 0$  ist die Probe im Vergleich zum Soll grüner, für  $\Delta a^* > 0$  rötlicher, für  $\Delta b^* < 0$  blauer und  $\Delta b^* > 0$  gelber.

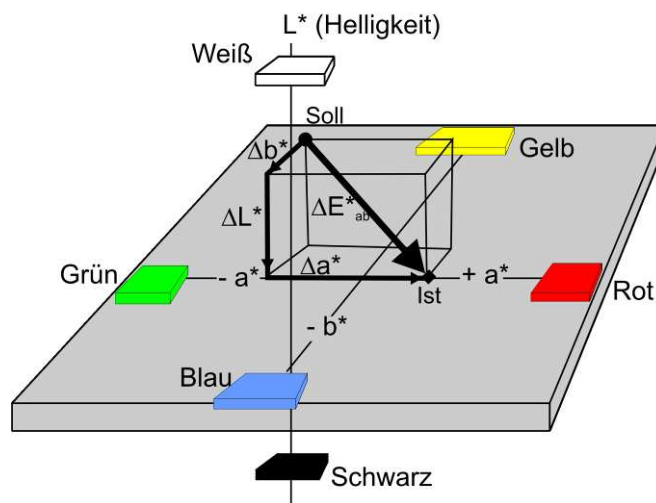


Abbildung 2-19: Darstellung des CIELAB-Farbraums zur Berechnung des Farbabstands  $\Delta E_{ab}^*$  aus den Soll- und Ist-Farbwerten (in Anlehnung an [LAN95])

### 2.4.3 Dichtemessung (Densitometrie)

Das Densitometer, dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 2-20 dargestellt ist, verfügt im Allgemeinen über eine Lichtquelle, ein Linsensystem, zwei



Polarisationsfilter, drei Farbfilter (abgestimmt auf die Skalenfarben Cyan, Magenta und Yellow) und eine Auswerteeinheit inklusive Sensor.

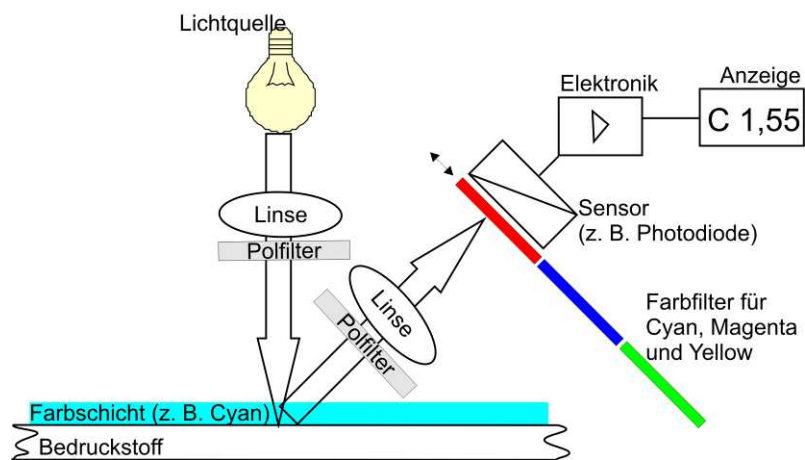


Abbildung 2-20: Messprinzip eines Densitometers (in Anlehnung an [TES97])

Von der Lichtquelle wird Licht auf die Probe gestrahlt. Das eingestrahlte Lichtspektrum wird durch die gedruckte Farbschicht transmittiert und vom Bedruckstoff remittiert und noch einmal durch die Farbschicht transmittiert. Das remittierte Licht wird anschließend nacheinander durch die drei Farbfilter auf den Sensor geleitet. In der Auswerteeinheit erfolgt die Umwandlung des Messsignals in die Anzeige der Dichte. In europäischen Densitometern werden zusätzlich Polarisationsfilter eingesetzt, um gleiche Messwerte für Messungen auf nassen und trockenen Druckproben zu erhalten. Durch den Einsatz von Polarisationsfiltern ergibt sich im Vergleich zu Messungen ohne Polarisationsfilter eine leicht höhere Dichte. In handelsüblichen Densitometern werden heute meist physikalische Farbfilter eingesetzt. Alternativ kann die Beleuchtung durch drei abgestimmte LEDs erfolgen. Neben der physikalischen Umsetzung im Messgerät besteht die Möglichkeit die Filter mathematisch zu simulieren (Kapitel 2.4.1) und die Dichte zu errechnen. Allen Methoden sind die zugrunde gelegten Empfindlichkeiten des Empfängersystems, welche beispielsweise in DIN 16536 angegeben sind, gemein.

Für die Messung der Dichte wird darüber hinaus nicht die sonst übliche Normlichtart D50, sondern die Normlichtart A für die Bewertung vorausgesetzt. Dies muss laut Norm in allen Messgeräten berücksichtigt werden.

Eine weitere Besonderheit der Densitometrie ist, dass in Europa alle Messungen auf den jeweiligen Bedruckstoff bezogen werden. Hierzu wird vor jeder Messung das Messgerät auf den Bedruckstoff kalibriert und somit wird die Dichte des Bedruckstoffs auf  $D_{\text{Bedruck}}=0$  eingestellt. Dieser Schritt ermöglicht es,

den Einfluss der Farbschichtdicke bzw. Pigmentierung direkt aus dem Messwert der Dichte abzulesen.

Übliche Werte der Dichte im Druck liegen aufgrund der Kalibrierung auf den Bedruckstoff zwischen  $D = 0$  für den unbedruckten Bedruckstoff und  $D = 3$  für eine schwarze deckende<sup>23</sup> Farbschicht. Die Dichte  $D = 3$  bestimmt sich aus der Überlegung, dass auch von einer deckenden schwarzen Farbschicht eine Remission ausgeht, die mit  $\beta(\lambda) \approx 0,1\%$  angenommen wird [TES97].

Da die Messung der Dichte immer auf Filtern (in mathematischer oder physikalischer Form) basieren, die auf die Skalenfarben abgestimmt sind, erlaubt sie keine Aussagen über die Farbwirkung. Vorteil der Densitometrie ist der direkte Rückschluss eines einzigen und einfach zu bestimmenden Messwertes auf die Veränderung der gedruckten Farbschichtdicke in Bezug auf den unbedruckten Bedruckstoff. Dieser Zusammenhang wurde bereits 1964 durch Tollenaar und Ernst für die Druckfarbe Schwarz festgestellt und in einer mathematischen Beschreibung gemäß Gl. (2.21) zusammengefasst [TOL64].

$$D = D_{\infty} \cdot (1 - e^{-ms}) \quad (2.21)$$

Hierin beschreibt  $D_{\infty}$  den Grenzwert der Dichte für sehr große Farbschichtdicken und  $m$  die Steigung der relativen Dichte pro Vergrößerungsschritt der Farbschichtdicke im kleinen Farbschichtdickenbereich (Abbildung 2-21).

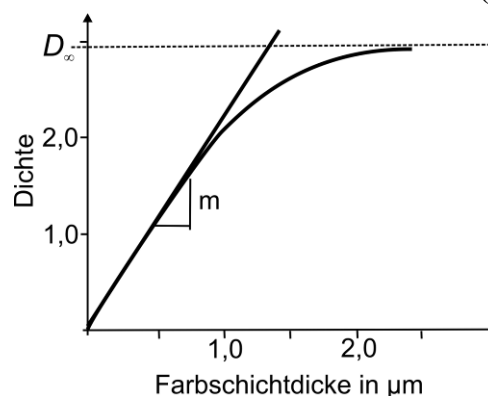


Abbildung 2-21: Schematisierte Darstellung des Zusammenhangs zwischen Dichte und Farbschichtdicke für eine beliebige Farbe unter Kennzeichnung der Parameter  $m$  und  $D_{\infty}$  (in Anlehnung an [TOL64])

<sup>23</sup> Eine Farbschicht wird als deckend bezeichnet, wenn der Untergrund, auf dem die Farbschicht appliziert wurde, nicht mehr durchscheint. Die Farbwirkung einer deckenden Farbschicht wird dann alleine durch die Reflexions- und Absorptionseigenschaften der Farbschicht bestimmt [KLE04].

Die mathematische Beschreibung basiert auf der Erkenntnis, dass die Dichte monoton (von null bis zu einer Sättigungsdichte  $D_\infty$ ) mit größer werdender Farbschichtdicke  $s$  ansteigt. Für kleine Werte der Farbschichtdicke  $s$  ergibt sich ein nahezu lineares Verhalten zwischen Farbschichtdicke und Dichte. Dieser Zusammenhang lässt sich vereinfachend durch Gl. (2.22) angeben.

$$D = D_\infty \cdot m \cdot s \quad (2.22)$$

Der durch Tollenaar und Ernst gezeigte Ansatz konnte auf alle Absorptionsfarben übertragen werden [BEL04]. Abbildung 2-22 zeigt anschaulich die Abhängigkeit der Dichte  $D$  unterschiedlicher Druckfarben von der gedruckten Farbschichtdicke  $s$ .

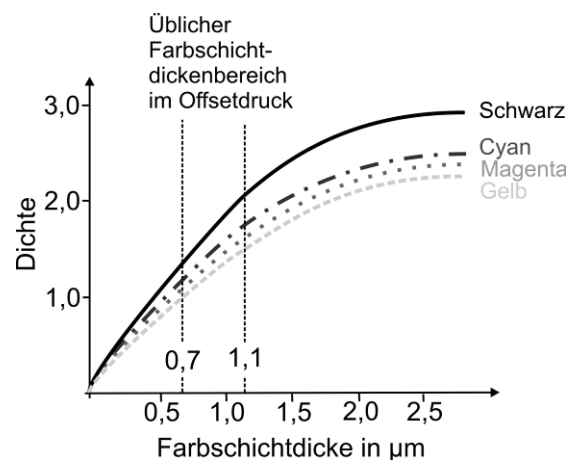


Abbildung 2-22: Qualitativer Zusammenhang zwischen gedruckter Farbschichtdicke  $s$  und gemessener Dichte  $D$  am Beispiel des Offsetdrucks für vier verschiedene Skalenfarben  
(in Anlehnung an BEL04)]

Ferner lässt sich der Abbildung 2-22 entnehmen, dass der lineare Zusammenhang, der durch Gleichung (2.22) beschrieben wird, seine Gültigkeit bis in den drucktechnisch interessanten Farbschichtdickenbereich (Offsetdruck  $0,7 \mu\text{m}$  bis  $1,1 \mu\text{m}$ ) zeigt. Darüber hinaus ist die Ausprägung des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke  $s$  und Dichte  $D$  vom gewählten Druckverfahren und dem Bedruckstoff abhängig. Daher muss für jedes Druckverfahren und jede Bedruckstoff-Druckfarbe-Kombination der Zusammenhang separat bestimmt werden.

### 2.4.4 Farbmessung

Mittels der Farbmessung ist es möglich, die Farbwirkung einer gedruckten Farbschicht zu erfassen. Sie nutzt die Grundlagen der Farbmatrik, um eine Beschreibung der Farbe durch drei Maßzahlen möglich zu machen. Für die Durchführung einer Farbmessung werden zwei Gerätetypen unterschieden: Dreibereichsmessgeräte und Spektralfotometer. Bei Dreibereichsmessgeräten erfolgt eine direkte Ermittlung der Farbwerte XYZ über geeignete Filter<sup>24</sup>. Aufgrund ihrer vielfältigeren Einsatzmöglichkeiten werden heute jedoch bevorzugt Spektralfotometer, die eine Messung der Remissionskurve erlauben, eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau eines Spektralfotometers ist Abbildung 2-23 zu entnehmen.

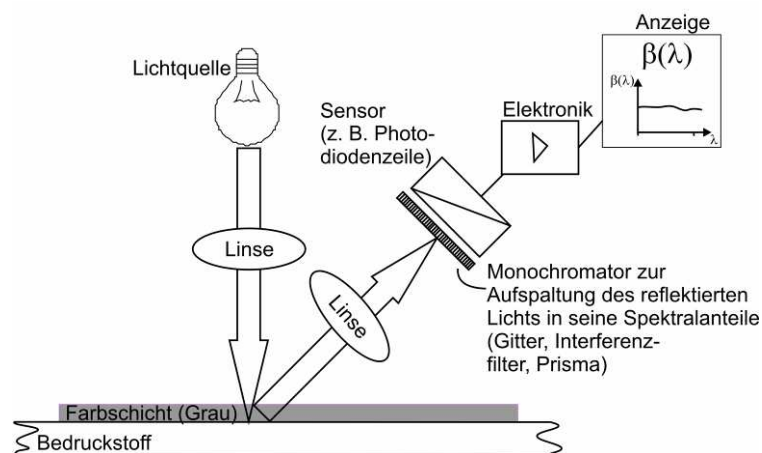


Abbildung 2-23: Messprinzip eines Spektralfotometers  
(in Anlehnung an [TES97])

Wie in Abbildung 2-23 zu sehen ist, fällt durch ein Linsensystem gebündeltes Licht (ausgehend von einer Lichtquelle) auf die bedruckte Fläche. In Abhängigkeit der Druckfarbe und der gedruckten Farbschichtdicke sowie den Eigenschaften des Bedruckstoffs werden Anteile des Lichtspektrums absorbiert, andere remittiert. Über ein weiteres Linsensystem wird der remittierte Anteil

<sup>24</sup> Die Filter von Dreibereichsmessgeräten besitzen die Eigenschaften der Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$ . Sie sind auf eine bestimmte Normlichtart und auf einen der beiden Normbeobachter (2° bzw. 10°) abgestimmt. Die direkt ermittelten Normfarbwerte X, Y und Z können daher nicht in eine andere Normlichtart oder in den anderen Normbeobachter umgerechnet werden. Die Messung mit Dreibereichsmessgeräten kommt daher nur für Relativmessung (Vorlage – Nachstellung) zu Einsatz. [LOO89]

über einen Monochromator (z. B. ein Gitter, Interferenzfilter oder Prisma) in einzelne Wellenlängenbereiche aufgeteilt und auf den Sensor geleitet. In der Elektronik-Einheit schließt sich eine Zuordnung der Wellenlängen zu den Messsignalen des Sensors sowie eine Umrechnung in eine Remissionskurve an. Abschließend wird die Remissionskurve in der Anzeige ausgegeben. Aus der Remissionskurve können nun die Farbwerte des CIEXYZ-Farbsystems und daraus die CIELAB-Farbwerte berechnet werden. Oftmals ist diese Umrechnung ebenfalls im Messgerät implementiert, sodass in der Anzeige zwischen  $XYZ$ -,  $L^*, a^*, b^*$ -Farbwerten und der Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  gewählt werden kann [TES97].

Da bei der Farbmessung im Gegensatz zur Densitometrie der Gesamtfarbeindruck, also das Zusammenwirken von Untergrund (Bedruckstoff) und Farbschicht, ermittelt werden soll, wird die Farbmessung immer auf einen Lambert-Reflektor (ideal mattweißer Körper) referenziert. Diesem ist eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Raumrichtungen und die Remission  $\beta(\lambda) = 100\%$  zugeordnet. Real kann ein Lambert-Reflektor nicht hergestellt werden. Für den täglichen Gebrauch werden daher Weißstandards mit nicht idealen Reflexionseigenschaften verwendet. Die Reflexionseigenschaften des Weißstandards werden von unabhängigen Institutionen (z. B. der Bundesanstalt für Materialprüfung) vermessen und zur Kalibrierung<sup>25</sup> der Messgeräte verwendet.

## 2.4.5 Messgeometrien zur Farb- und Dichtemessung

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den Farb- und Dichtemessgeräten verschiedener Branchen ist die zur Messung herangezogene Messgeometrie. Messgeräte zur Farb- und Dichtemessung im Druck werden alle, aufgrund der mit DIN ISO 13655 vorgegebenen Normierung, mit einer

---

<sup>25</sup> Während der Kalibrierung wird der Weißstandard, wie oben für den Fall einer gedruckten Farbschicht beschrieben, beleuchtet und seine Remission in den einzelnen Wellenlängenbereichen ermittelt. Die gewonnen Messergebnisse werden mit den im Messgerät hinterlegten Remissionswerten des Weißstandards verglichen und die Abweichung zwischen gemessenen Ist-Werten und den vorgegebenen Werten ermittelt. Bei einigen Messgeräten erfolgt darüber hinaus eine Justierung der Remissionswerte des Weißstandards auf  $\beta(\lambda) = 100\%$  für alle Wellenlängen des sichtbaren Bereichs.

45°/0°- bzw. 0°/45°- Messgeometrie ausgestattet. In anderen Branchen, z. B. der Papierindustrie oder der Textilindustrie, werden vorwiegend Messgeräte mit einer Kugelgeometrie (d/0° bzw. d/8°) eingesetzt. In der Automobilindustrie hingegen werden schon heute Mehrwinkelspektralfotometer eingesetzt, die eine Messung mit unterschiedlichen Messgeometrien erlauben. Im folgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen Messgeometrien vorgestellt und die Notwendigkeit zur Messung in unterschiedlichen Messgeometrien in Bezug auf Interferenzeffektpigmente/-farben erläutert.

Abbildung 2-24 zeigt die heute in der Druckindustrie vorzufindenden Messgeometrien 45°/0° bzw. 0°/45°. Bei diesen Messgeometrien erfolgt eine Bestrahlung der Probe unter einem Einstrahlwinkel von 45° bzw. 0° und eine Messung unter 0° bzw. 45°. Beide Messgeometrien werden dabei als gleichwertig erachtet [KLE04]. Neben der Beleuchtung durch eine Lichtquelle (Abbildung 2-24 a) und b)) werden Messgeräte mit einer bidirektionalen oder einer zirkularen Beleuchtung ausgeführt. Bei der bidirektionalen 45/0-Geometrie werden zwei Lichtquellen um 180° versetzt angeordnet (Abbildung 2-24 c)). Die zirkulare 45/0-Geometrie arbeitet mit einem Ringspiegel, durch den das Licht der Lichtquelle ideal kreisförmig auf die Probe gelenkt wird (Abbildung 2-24 d)). Beide Geometrien zeigen gegenüber der Beleuchtung mit nur einer Beleuchtungsquelle Vorteile bei unebenen Oberflächen.

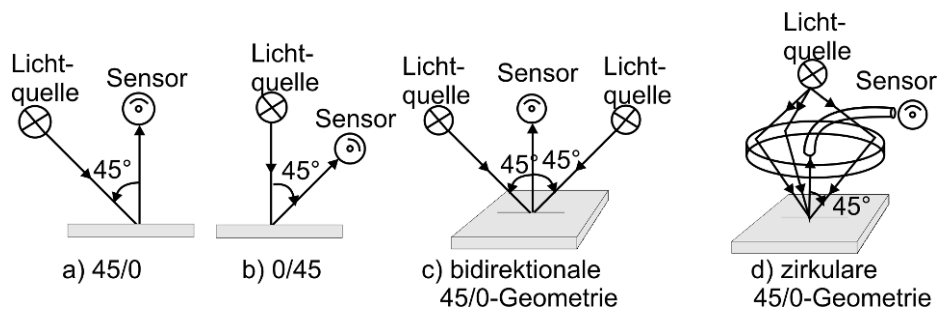


Abbildung 2-24: gerichtete Messgeometrien (45/0, 0/45): a) 45/0-Geometrie; b) 0/45-Geometrie; c) bidirektionale 45/0-Geometrie; d) zirkulare 45/0-Geometrie (in Anlehnung an [KLE04])

Aufgrund der Winkelanordnung im Messgerät wird die Reflexion in einem von der Glanzrichtung entfernten Winkel gemessen. Hierdurch kann ausgeschlossen werden, dass der Glanz die zu messende Farbwirkung beeinflusst.

Als Lichtquellen werden in den Farb- und Dichtemessgeräten der Druckindustrie fast ausschließlich Glüh- oder Halogenlampen (Lichtart A) eingesetzt. Diese Wahl beruht auf den Vorschriften der [DIN 16536], die für die

Messung der Dichte die Verwendung der Normlichtart A vorschreibt. Für die Farbmessung nicht fluoreszierender Proben wird in der [DIN ISO 13655] auf die Bedeutungslosigkeit der spektralen Verteilung der beleuchtenden Lichtart hingewiesen. Sollen jedoch Messergebnisse unterschiedlicher Messgeräte bei einer Messung fluoreszierender Proben verglichen werden, wird in [DIN ISO 13655] empfohlen eine Beleuchtungsquelle, welche eine spektrale Energieverteilung ähnlich der Lichtart D50 aufweist, zu verwenden. Aus Kostengründen wird für die Farbmessung in der Druckindustrie dennoch hauptsächlich auf Glüh- und Halogenlampen als Beleuchtungsquelle zurückgegriffen.

Im Druck sind die Anforderungen an die Messfeldgröße sehr streng. Um jede Druckfarbe einzeln bewerten zu können, werden sogenannte Druckkontrollstreifen auf den Druckbogen aufgebracht. Diese stellen Messfelder einer maximalen Größe von 5 mm<sup>2</sup> zur Verfügung, in denen die im Prozess verwendeten Druckfarben in Vollton-<sup>26</sup> und Tonwertfeldern<sup>27</sup> einzeln überprüft werden können (Abbildung 2-25).

Eine Besonderheit besteht hierbei in Bezug auf den Offsetdruck. Wie bereits in Kapitel 2.1.5 erläutert, können im Offsetdruck die gedruckten Farbschichtdicken über der Formatbreite durch die Farbzonen gezielt beeinflusst werden. Daher werden die Messfelder des Druckkontrollstreifens so über der Formatbreite verteilt, dass sie den Farbzonen des Farbwerks zugeordnet werden können. Hierdurch wird eine direkte Rückführung der Messwerte auf die Steuergröße der Farbschieber möglich.

---

<sup>26</sup> Volltonfelder werden für die Messung der übertragenen Farbschichtdicke genutzt. Die Messwerte können im Fall des Offsetdrucks direkt zur Steuerung der Farbschieber des Farbkastens herangezogen werden.

<sup>27</sup> Tonwertfelder dienen zur Ermittlung des Punktzuwachs (Tonwertzunahme). Diese Kontrolle ist notwendig, da eine Veränderung der Tonwertzunahme zu einer Veränderung der Farbwirkung des Druckbildes führt.

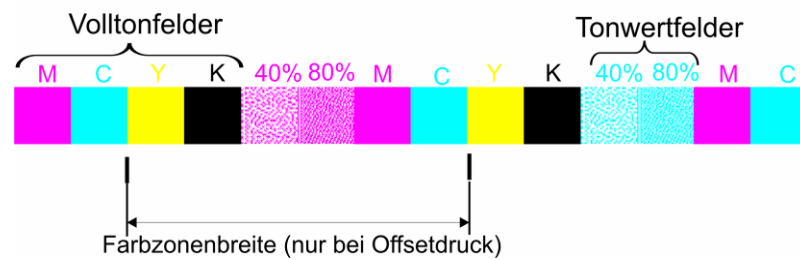


Abbildung 2-25: Ausschnitt aus einem offsetdrucktypischen Druckkontrollstreifen mit Vollton- und Tonwertfeldern zur Messung und visuellen Kontrolle der Einzelfarben (in Anlehnung an [KIP00])

Aus der Größe der Messfelder des Druckkontrollstreifens unter Einbeziehung der Norm ISO 5-4 ergibt sich für die Messgeräte eine maximal zulässige Messfeldgröße von  $\varnothing 3$  mm.

Abbildung 2-26 zeigt die vorwiegend in der Papier- und Textilindustrie eingesetzte Messgeometrie d/8. Sie kennzeichnet eine Kugelgeometrie mit Beobachtung unter  $8^\circ$ . Das von der Lichtquelle ausgesendete Licht wird an der Innenfläche einer geeignet beschichteten Ullbricht-Kugel in unterschiedliche Richtungen reflektiert. Hierdurch erfolgt eine diffuse Beleuchtung der Probe. Zur Eliminierung der Glanzeffekte wird der Sensor unter einem Winkel von  $8^\circ$  angeordnet. Des Weiteren besteht die Möglichkeit eine zusätzliche Glanzfalle, die unter  $-8^\circ$  angeordnet wird, einzusetzen.

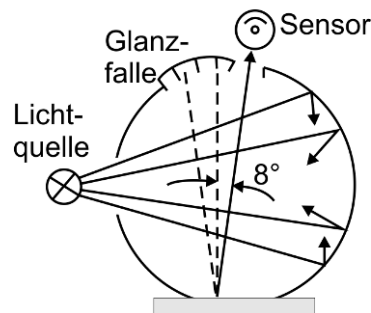


Abbildung 2-26: Kugelmessgeometrie d/8 mit Glanzfalle [nach KLE04]

Neben der Messgeometrie unterscheiden sich Farbmessgeräte der Papier- und Textilindustrie durch die verwendete Lichtquelle (Xenon-Blitzlampe) und die Messfeldgröße ( $\varnothing > 8$  mm).

Besondere Anforderungen an die Messgeometrien werden durch die „speziellen Effektpigmente“ gegeben. Bereits Bäumer [BÄU73a] stellte 1973 fest, dass die Messgeometrien 45/0 bzw. 0/45 und d/0 bzw. d/8 nur unbefriedigende Ergebnisse in Hinblick auf die Farbmessung von Perlglanzeffektfarben liefern.



Er zeigte, dass zwei unterschiedliche Effektfarben gleicher Pigmentkonzentration bei der Messung mit einer d/0-Messgeometrie, nahezu die gleiche Remissionskurve zeigen [BÄU73c]. In der darauf folgenden Zeit wurden unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung der Farbmessung verfolgt. Ein historischer Rückblick bezüglich der Entwicklung der winkelabhängigen Farbmessung kann der Literatur entnommen werden, z. B. [PFA07a].

Vor allem durch die Entwicklung der Interferenzeffektpigmente der zweiten Generation, die ein ausgeprägtes Farbflop-Verhalten mit einer Veränderung des Einstrahlwinkels zeigen, wurde die Entwicklung von Farbmessgeräten mit variierbarem Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel notwendig [CRA03b]. Über einen variierbaren Beleuchtungswinkel und einen festgehaltenen Differenzwinkel zum Glanz (auch Aspektwinkel genannt) ist es möglich den Einfluss der unterschiedlichen Einstrahlwinkel auf die Farbwirkung, die so genannte „Interferenzlinie“ („interference line“) zu erfassen. Hierbei muss ein kleiner Differenzwinkel ( $\gamma < 30^\circ$ ) vorliegen, um den Interferenzeffekt, der sich vorwiegend im und nahe des Glanzwinkels zeigt, erfassen zu können [HOF90]. Wird hingegen der Beleuchtungswinkel festgehalten und der Differenzwinkel zum Glanz variiert, so lässt sich die Glanzlinie („aspecular line“) erfassen. Darüber hinaus hat sich bei der Untersuchung von Interferenzeffektfarben der Einfluss der Lage des Differenzwinkels gegenüber der Beleuchtungsrichtung gezeigt [CRA92]. Hierbei wird von der „cis-Stellung“ gesprochen, wenn sich der Sensor auf der Seite der Beleuchtung befindet (positiver Differenzwinkel  $+\gamma$ ). Als „trans-Stellung“ wird die Positionierung des Sensors auf der gegenüberliegenden Seite bezeichnet (negativer Differenzwinkel  $-\gamma$ ), siehe Abbildung 2-27.

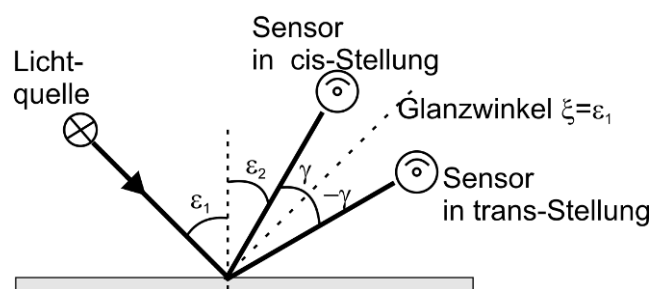


Abbildung 2-27: Schema der Mehrwinkelmessgeometrien unter Kennzeichnung des Glanzwinkels  $\xi = \varepsilon_1$ , des Differenzwinkels  $\gamma$  und der cis- sowie trans-Stellung des Sensors.

Heute beschäftigt sich die ASTM mit der Festlegung und Normung geeigneter Messgeometrien. In ihrem Normentwurf ASTM WK 1164 werden derzeit die in

Abbildung 2-28 aufgeführten Messgeometrien vorgeschlagen. Die Zahl vor dem Schrägstrich bezeichnet den Einstrahlwinkel  $\varepsilon_1$ , die Zahl hinter dem Schrägstrich die Stellung des Sensors  $\varepsilon_2$ . Durch den Zahlenwert der Angabe as... wird der Differenzwinkel  $\gamma$  angegeben. Das Vorzeichen indiziert die Stellung des Sensors gegenüber dem Glanzwinkel. Das negative Vorzeichen steht für die trans-, das positive Vorzeichen für die cis-Stellung des Sensors.

In der Tabelle der Abbildung 2-28 ist die Messgeometrie 65/-50 (as15) abweichend zu den anderen Messgeometrien unterlegt dargestellt. Diese Darstellung wurde gewählt, da im Normentwurf die Messgeometrie 65/-50 (as15) als zusätzliche, jedoch unverbindliche, Messgeometrie angegeben wird.

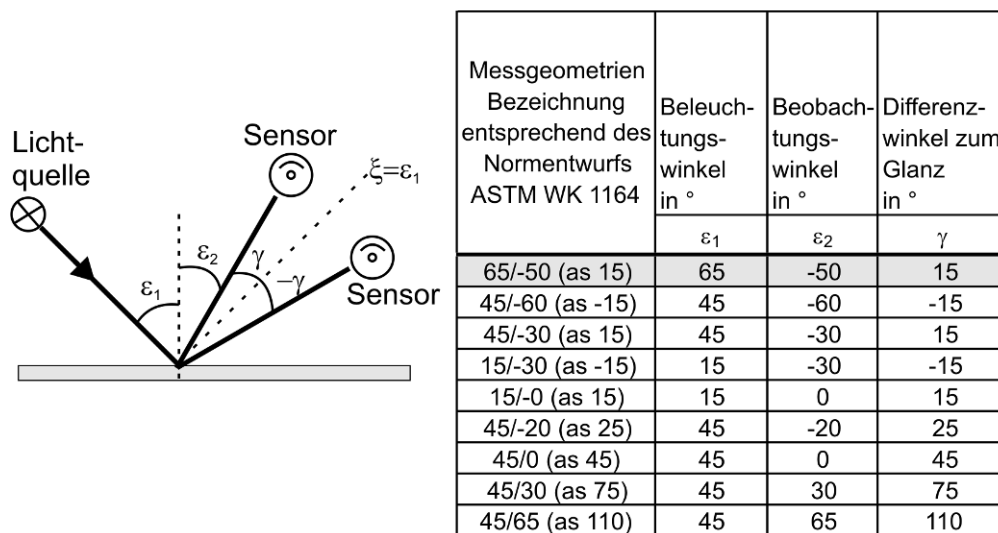


Abbildung 2-28: Messgeometrien entsprechend des Normentwurfs ASTM WK 1164

Zusammenfassend sind alle Anforderungen an die Messgeometrien zur Charakterisierung von Metall- und Interferenzeffektpigmenten dargestellt [PFA07a]:

- Beleuchtung mit dem klassischen Winkel  $\varepsilon_1 = 45^\circ$  und Beobachtung unter verschiedenen Differenzwinkeln die bereits heute in der Normung, insbesondere für die Messung von Metallic-Effekten Einzug gehalten haben [DIN 6175-2]:

Beobachtungswinkel:  $\varepsilon_2 = 0^\circ, -20^\circ, 30^\circ$  und  $65^\circ$  bzw.

Differenzwinkel:  $\gamma = 45^\circ, 25^\circ, 75^\circ$  und  $110^\circ$

- Mindestens zwei unterschiedliche Beleuchtungswinkel bei gleichbleibendem Differenzwinkel zur Messung der Farbwirkung aus

Interferenzeffekten:  $\varepsilon_l = 15^\circ, 45^\circ$  und den Differenzwinkeln  $\gamma = -15^\circ$  und  $+15^\circ$

Für einige Industrien wurden die in der Norm vorgeschlagenen Messgeometrien bereits alle bzw. teilweise umgesetzt [HUP06]. Zu verweisen ist an dieser Stelle auf das Messgerät Multi FX10 der Firma Datacolor, welches als einzigstes industriell verfügbares Messgerät alle Messgeometrien in einem Messgerät verwirklicht hat. Darüber hinaus gibt es seit 2007 das Messgerät BYC-mac, das eine Messung mit den nach DIN 6175-2 definierten Messgeometrien und darüber hinaus mit der 45/-60 (as-15)-Messgeometrie (Messung in trans-Stellung) ermöglicht.

## 2.5 Qualitäts- und Prozesskontrolle im Druck

Nachdem in den vorausgegangenen Abschnitt die Grundlagen bezüglich der Farb- und Dichtemessung gelegt wurden, wird in diesem Abschnitt auf die Unterscheidung zwischen Qualitäts- und Prozesskontrolle im Druck eingegangen.

Umgangssprachlich werden die Begriffe Qualitäts- und Prozesskontrolle häufig synonym verwendet. Dies zeigt auch Günther [GÜN97], der unter dem Begriff „statistische Qualitätskontrolle“ zwei Anwendungsbereiche vereint:

1. Überprüfung der Qualität einzelner Produkte, um bei Produktionsfehlern das ganze Los zurückzuweisen (meist in der Wareneingangskontrolle oder Endkontrolle).
2. Überwachung des Produktionsprozesses. Aus der laufenden Produktion werden Stichproben entnommen und geprüft. Entsprechen die Produkte nicht den gesetzten Normen, wird der Produktionsprozess neu justiert. Diese Prozesskontrolle zielt somit auf die Qualität der Produktion in der Zukunft ab.

Im online verfügbaren Wirtschaftslexikon [WIR07] und in Meyers LexikonOnline [MEY07] ist der Begriff der statistischen Qualitätskontrolle ebenfalls aufgeführt. Hieraus kann eine Erweiterung der oben aufgeführten Differenzierung zwischen Prozessüberwachung (Punkt 2) und Überprüfung der Qualität (Punkt 1) entnommen werden. Die in Punkt 1 genannte Überprüfung der Qualität, oder auch kurz „Qualitätskontrolle“, beinhaltet die systematische Überprüfung aller die Produktqualität beeinflussenden Faktoren [WIR07]. Sie umfasst einen Soll-Ist-Wertvergleich, um festzustellen, inwiefern ein Produkt

die Qualitätsanforderungen erfüllt [MEY07]. Für die in Punkt 2 genannte Prozessüberwachung („Prozesskontrolle“) werden einige Exemplare entnommen, um auf Basis dieser Stichproben im Vergleich zu früheren Stichproben mögliche Abweichungen von Voreinstellungen der Maschine zu ermitteln [WIR07].

Es stellt sich nun die Frage, welche Bedeutung die oben genannte Unterscheidung für diese Arbeit einnimmt. Die im Druckprozess entscheidende Qualitätsgröße ist die Güte der Reproduktion von Vorlagen. Neben der Einhaltung weiterer Qualitätsmerkmale, wie z. B. der Auflösung (Schärfe, Gradation), des Passers bzw. des Registers (Position der Rasterpunkte bzw. Position des Druckbildes) und der Oberfläche (Glanz, Wolkigkeit, Ebenheit), spielt die Wiedergabe der Farbwirkung eine essenzielle Rolle [KIP00].

Zur Erzielung einer nahezu exakten Farbwirkung der Vorlage im Druck werden abhängig vom gewählten Druckverfahren und der gewünschten Anforderungen des Endkunden unterschiedliche Methoden eingesetzt. Hierzu zählen die Farbmessung, die Densitometrie und die visuelle Kontrolle. Während die Farbmessung die erzielte Farbwirkung ganzheitlich betrachtet (Kapitel 2.4.4), ermöglicht die Dichtemessung (Kapitel 2.4.3) lediglich die Registrierung einer Veränderung der gedruckten Farbschichtdicke  $s$ . Die visuelle Kontrolle ermöglicht wiederum eine ganzheitliche Beurteilung der Reproduktion, liefert jedoch keine objektiven Ergebnisse, da sie dem menschlichen Urteil und damit verbundenen unterschiedlichen Bewertungsmaßstäben unterliegt.

Der Druckprozess lässt sich, wie in der folgenden Abbildung 2-29 dargestellt, in drei Arbeitsabschnitte, die jeweils mit einer Prozessregelung bzw. abschließend mit einer Qualitätskontrolle verbunden sind, einteilen.

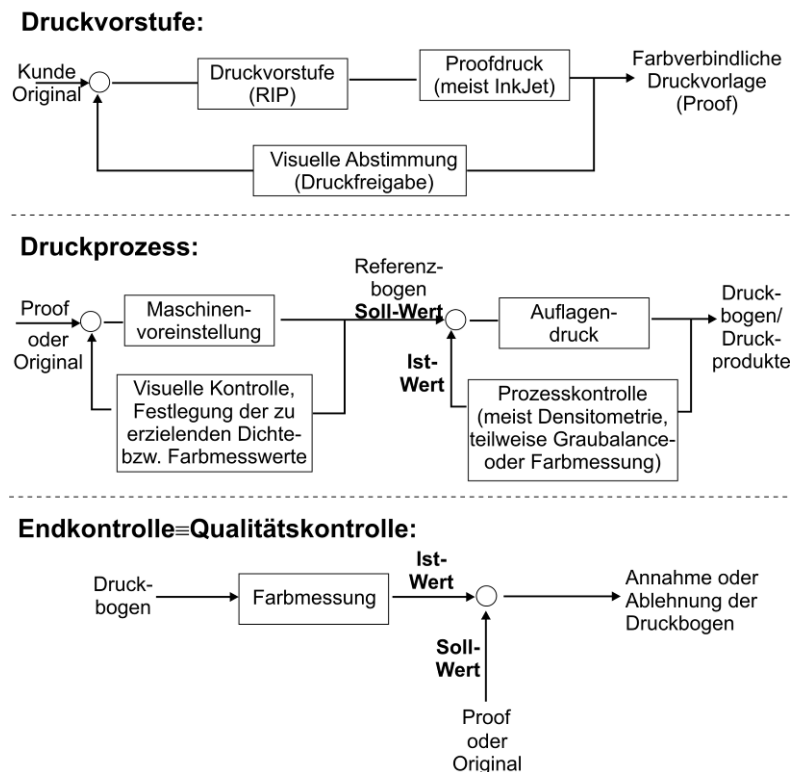


Abbildung 2-29: Darstellung der Prozessregelung in der Druckvorstufe und im Druckprozess sowie der abschließenden Qualitätskontrolle

Die Druckvorstufe erhält ein zu reproduzierendes Original von einem Kunden. Dieses Original stellt den zu erzielenden Soll-Wert des gesamten Prozesses dar. In der Druckvorstufe wird das Original des Kunden in ein druckbares Format umgesetzt und ein sogenannter Proofdruck erstellt. Dieser Proof wird in einem ersten Regelprozess, meist durch eine visuelle Abstimmung mit dem Original, so weit bearbeitet, bis durch den Kunden eine Druckfreigabe erfolgt, aus der eine farbverbindliche Druckvorlage (Proof) hervorgeht. Die technischen und qualitativen Verbesserungen des Proofs haben dazu geführt, dass der Proof zunehmend das Original als Qualitätsvorlage ersetzt.

Die farbverbindliche Druckvorlage (Proof) bzw. das Original stellt die Soll-Wertvorgabe des eigentlichen Druckprozesses dar. Da der Proof meist im InkJet-Verfahren hergestellt wird, kann die durch ihn gegebene Soll-Wertvorgabe im eigentlichen Druckprozess meist nicht exakt eingehalten werden. Daher erfolgt zu Beginn eines Druckprozesses meist die Einstellung der Maschine durch einen visuellen oder messtechnischen Abgleich mit der Vorlage (Proof bzw. Original), aus dem ein Referenzbogen mit der bestmöglichen Reproduktion der Vorlage hervorgeht. Dieser dient in dem anschließenden Auflagedruck, also der Herstellung der Druckprodukte, zur Festlegung der

Soll-Werte. Aufgrund von Schwankungen während des Prozesses ist eine ständige Prozesskontrolle und eine Regelung des Prozesses notwendig. Hierzu wird in der Druckindustrie heute vorwiegend die Regelung nach Dichte (Volltondichte und Tonwertzunahme) eingesetzt. Diese ermittelt aus dem in Kapitel 2.4.3 dargestellten Zusammenhang zwischen Farbschichtdicke und Dichte die Einstellungen der Farbzufuhr. Zum Teil wird heute eine Regelung nach farbmetrischen Werten [HEI05] oder eine Regelung der Graubalance nach Brunner [BRU07] genutzt. Gegenüber der Anwendung der Regelung nach Dichte werden die Regelstrategien nach farbmetrischen Werten und nach Brunner nur in unerheblichem Maße eingesetzt.

Am Ende des Druckprozesses steht die Endkontrolle der erstellten Druckprodukte. In Bezug auf die Qualität der Farbproduktion kann in diesem Fall nur die Farbmessung zum Einsatz kommen. Durch sie werden die ermittelten Farbwerte der Druckprodukte und die des Proofs gegenübergestellt und die Abweichung anhand des Farbabstandes  $\Delta E_{ab}$  bewertet. Liegt der ermittelte Farbabstand  $\Delta E_{ab}$  innerhalb vorgegebener Toleranzen, führt dies zu einer Annahme der Druckbogen. Liegt er außerhalb der Toleranz, muss über eine Ablehnung der Druckbogen entschieden werden. Eine Rückführung auf den Prozess ist in diesem Abschnitt nicht mehr möglich.

Allen Regelungsstrategien ist heute die Regelung mit einer großen Totzeit gemeinsam, da sich eine Inline-Messung der Dichte bzw. der Farbe bisher noch nicht etablieren konnte. In der Integration solcher Inline-Messsysteme ist derzeit ein Forschungsgegenstand zu sehen. Hierbei wird insbesondere die Integration von Kamerasystemen zur Farb- und Dichtemessung angestrebt.

## 2.6 Gedruckte Interferenzeffektfarben

Druckfarben, die Interferenzeffektpigmente beinhalten, im Folgenden kurz Interferenzeffektfarben genannt, werden heute vorwiegend zur Veredelung von Produkten, vor allem im Verpackungsdruck eingesetzt. Während die Verpackung früher vor allem den kostbaren Inhalt vor Beschädigungen schützen sollte, so kommt ihr heute eine weitere Aufgabe zu: Die Aufmerksamkeit des Konsumenten auf das Produkt zu lenken und dadurch ein Objekt der Begierde zu kreieren. Um dies zu erreichen, werden daher heute vermehrt Druckfarben mit „Speziellen Effektpigmenten“, meistens in Form von Metalloxid- und

Interferenzeffektpigmenten der ersten Generation (Glimmerpigmente) eingesetzt.

Führend auf dem Gebiet des Verpackungsdrucks und der Veredelung sind der Flexo- und der Tiefdruck, da hiermit große Effekte erzielt werden können. Oftmals wird der Flexodruck (hier Lackwerk genannt) dabei in Kombination mit dem Offsetdruck eingesetzt. Aufgrund der geringen Farbschichtdicken, die im Offsetdruck erzielt werden können, lassen sich vergleichsweise geringere Effekte als im Tief- oder Flexodruck erzielen. Für den Einsatz im Offsetdruckverfahren eignen sich Pigmente mit einer Teilchengröße von 5 µm bis 25 µm. Für den Tief- und Flexodruck hingegen sind Pigmentgrößen von 5 µm bis 125 µm möglich [PFA07a]. Aufgrund der, im Vergleich zur Pigmentdicke (ca. 0,2 µm bis 0,5 µm), sehr großen Flächen der Effektpigmente kommt es zu einer nahezu planparallelen Ausrichtung der Pigmente innerhalb der gedruckten Druckfarbschicht. Diese Ausrichtung wird durch glatte Bedruckstoffe unterstützt. Je glatter die Oberfläche des Bedruckstoffs ist, desto besser können sich die Effektpigmente ausrichten und ihre typischen Eigenschaften zur Wirkung bringen. Rein technisch gesehen können auch raue Naturpapiere mit Effektpigmenten bedruckt werden, doch infolge der rauen Oberfläche kann es zu einer nicht ideal planparallelen Ausrichtung der Effektpigmente kommen. Dadurch werden Streueffekte bewirkt, die sich der eigentlichen Farbwirkung überlagern und so die Glanzwirkung reduzieren [PFA07a].

Allen Anwendungsgebieten im Druck ist eine fehlende Qualitäts- und Prozesskontrolle für Interferenzeffektfarben gemeinsam. Dies ist auf fehlende Messgeräte und die Unkenntnis des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke und den Messgrößen der Farb- und Dichtemessung zurückzuführen. So wird auch in [PFA07a] eine Bewertung der gedruckten Interferenzeffektfarbe nach visuellen Gesichtspunkten empfohlen. Bestrebungen, eine Verbesserung der Situation durch eine Erweiterung der Norm bzw. durch Neuentwicklungen von Farbmessgeräten zu bewirken, sind für den Druckbereich im Gegensatz zur Automobilindustrie nicht erkennbar.

Forschungsaktivitäten sind, mit Ausnahme der im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichten Berichte [HUP06], [HUP07a] und [HUP07b] sowie die Patent- und Gebrauchsmusteranmeldungen [HUP07c], [HUP07d] und [HUP07e], aus der Literatur nicht bekannt.

### 3 Zielsetzung der Arbeit

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Grundlagen der Qualitäts- und Prozesskontrolle sowie die Herausforderungen des Drucks, insbesondere bezüglich Interferenzeffektfarben, dargestellt. Hierbei erfolgte bereits die Darstellung des derzeitigen Stands der Technik und Forschung hinsichtlich gedruckter Interferenzeffektfarben. Es hat sich gezeigt, dass bis heute noch keine Messtechnik für den Druckbereich zur Farbmessung gedruckter Interferenzeffektfarben entwickelt wurde. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, dass grundsätzliche Zusammenhänge bezüglich der gedruckten Farbschichtdicke nicht bekannt sind.

Somit besteht die Zielsetzung der Arbeit in der grundlegenden Untersuchung des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke und den Messgrößen der Prozesskontrolle (Messung der optischen Dichte bzw. gegebenenfalls anderer Messgrößen) und Qualitätskontrolle (Ermittlung der Farbwerte). Aus den hier resultierenden Erkenntnissen sollen ferner Strategien zur Prozess- und Qualitätskontrolle entwickelt werden.

Eine Grundvoraussetzung ist die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen gedruckter Farbschichtdicke und qualitätsbeschreibendem Messwert. In Kapitel 4 werden daher zunächst die Vorgehensweise und die Herstellung von Druckproben mit Interferenzeffektfarben definierter Farbschichtdicke beschrieben. Darüber hinaus erfolgt eine Vorstellung aller für diese Arbeit herangezogenen Messgeräte. Aus den Ergebnissen der Auswertung werden im Folgenden Messgeometrien zur Qualitätskontrolle (Kapitel 5) und Messgrößen zur Prozesskontrolle (Kapitel 6) abgeleitet.

In der Druckindustrie findet heute ausschließlich eine Bewertung der Farbwirkung im CIELAB-Farbsystem statt. Andere Farbsysteme, wie z. B. DIN99 oder die Farbabstandsbewertung nach CIEDE2000, sind in diesem Bereich unbekannt. In Bezug auf die Darstellung der Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten wird in der Literatur ebenfalls auf das CIELAB-Farbsystem zurückgegriffen. Im Folgenden werden daher alle Farbwerte entsprechend der Berechnungsvorschriften des CIELAB-Farbsystems ermittelt und eine Bewertung der Veränderung der Farbwirkung mittels des Farbabstands  $\Delta E_{ab}$  vorgenommen.



## 4 Probenherstellung und Auswertung

Das folgende Kapitel stellt die Vorgehensweise der Probenherstellung und ihre Auswertung dar. Hierzu werden einleitend die Funktionsweise der Bedruckbarkeitsgeräte und der Ablauf der Bedruckbarkeitsversuche vorgestellt. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Auswahl der Druckparameter, insbesondere der Bedruckstoffe und der Druckfarben sowie der aus den Vorversuchen hervorgegangenen Einstellparameter der Bedruckbarkeitsgeräte. Im dritten Abschnitt wird auf die eigentliche Probenherstellung eingegangen. In diesem Zusammenhang wird die Probenherstellung im Flexo- und dem Offsetdruck mit Bedruckbarkeitsgeräten und für Offsetdruckfarben zusätzlich die Probenherstellung mit einem Stufenspaltrakel dargestellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels widmet sich der Auswertung der erstellten Druckproben. Hier werden die verwendeten Farb- und Dichtemessgeräte vorgestellt und auf die Berechnung der Dichte und der CIELAB-Farbwerte eingegangen.

### 4.1 Probenherstellung

Grundvoraussetzung für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke und qualitativen Messwerten ist die Kenntnis der gedruckten Farbschichtdicke. Dies stellt besondere Anforderungen an die Probenauswahl und die Probenherstellung. Eine Probenauswahl wird durch Farbkarten der Firma Merck [MER07b], welche für unterschiedliche Druckverfahren erstellt wurden, zur Verfügung gestellt. Sie bieten Farbproben für die unterschiedlichen Interferenzeffektfarben des Lieferprogramms. Als problematisch bezüglich dieser Farbproben stellt sich die Angabe der gedruckten Farbschichtdicke sowie die Auswahl mehrerer unterschiedlicher Farbschichtdicken an. Aufgrund dessen können diese Farbproben nicht für die Analyse des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke und qualitativen Messwerten herangezogen werden. Darüber hinaus ist eine Probenherstellung mittels konventioneller Druckmaschinen nicht möglich, da hier aufgrund ihres komplexen Aufbaus keine genauen Angaben über die gedruckte Farbschichtdicke gemacht werden können.

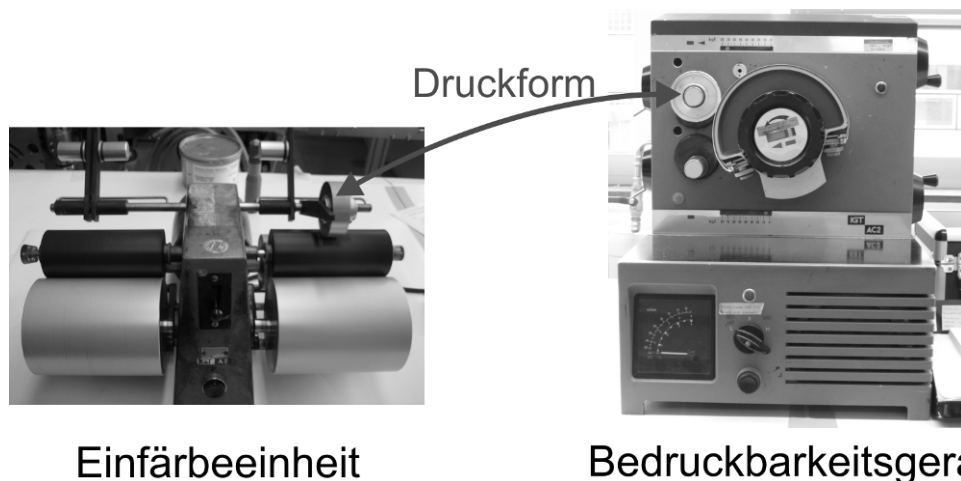
Im Folgenden wurde nach einer Lösung zur Herstellung von Druckproben definierter Eigenschaften gesucht. Eine Möglichkeit wurde in der Verwendung von sogenannten Bedruckbarkeitsgeräten und dem im DIN 16519-2 dargestellten Verfahren zur „Prüfung von Drucken und Druckfarben des grafischen Gewerbes; Herstellung von Norm-Druckproben für optische Messungen“ gesehen. Dieses Verfahren richtet sich an die Qualitätsprüfung<sup>28</sup> von Skalenfarben. Es wird darüber hinaus zur Ermittlung der Färbungsreihe<sup>29</sup> für die Regelung nach farbmetrischen Werten eingesetzt. Bedruckbarkeitsgeräte bieten auf wenige Verfahrensparameter reduzierte Teilsysteme mit definierten Bedingungen. Der Aufbau der Bedruckbarkeitsgeräte und der Ablauf der Druckprobenherstellung variieren mit dem zu prüfenden Druckverfahren.

Abbildung 4-1 zeigt eine Fotografie des verwendeten IGT-Bedruckbarkeitsgerätes für den Offsetdruck mit dazugehöriger Einfärbeeinheit und Druckform.

---

<sup>28</sup> Skalenfarben müssen nach ISO 2846 in einem definiertem Farbschichtdickenbereich (Offsetdruck) bzw. für definierte Bedingungen (Viskosität der Druckfarbe und Rasterwalze) im Flexodruck eine vorgegebene Farbwirkung erzielen. Durch die Qualitätskontrolle mittels Bedruckbarkeitstest wird die Einhaltung der vorgegebenen Eigenschaften überprüft.

<sup>29</sup> Der Regelung nach farbmetrischen Werten wird eine sogenannte Färbungsreihe (Drucke mit variiertem Farbschichtdicke) zugrunde gelegt. Aus der Farbmessung der Färbungsreihe wird das Verhalten der Farbwirkung in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke bestimmt und im CIELAB-Farbsystem als Färbungslinie dargestellt. Der Soll-Farbwert, gegeben durch das Original oder den Proof, wird mit der Färbungslinie verglichen. Durch die Regelung der Farbschichtdicke kann dann entlang der Färbungslinie die bestmögliche Annäherung an den Soll-Farbwert erreicht werden. [HEI06b]



Einfärbeeinheit

Bedruckbarkeitsgerät

Abbildung 4-1: IGT-Bedruckbarkeitsgerät für den Offsetdruck mit dazugehöriger Einfärbeeinheit der Druckform

Der allgemeine Ablauf zur Herstellung von Druckproben im Offsetverfahren ist in DIN 16519-2 angegeben:

- Aufbringen einer definierten Farbmenge  $m_{\text{Druckfarbe}}$  mittels einer Pipette auf die Einfärbeeinheit.
- Wägen der nicht eingefärbten Druckform zur Klärung des Ausgangsgewichts  $m_{\text{Druckform\_ohne}}$ .
- Einfärben der Druckform auf der Einfärbeeinheit.
- Wägen der eingefärbten Druckform vor dem Druck  $m_{\text{vor}}$ .
- Abdrucken unter zuvor festgelegten und für die gesamte Probenherstellung festgehaltenen Einstellungen.
- Wägen der abgedruckten Druckform  $m_{\text{nach}}$ .
- Abschließende Reinigung der Druckform und der Einfärbeeinheit.

Aus dem Gewicht der nicht eingefärbten Druckform sowie des Gewichts der Druckform vor  $m_{\text{vor}}$  und nach dem Druck  $m_{\text{nach}}$  lässt sich nach Gleichung (4.1) die gedruckte Farbschichtdicke  $s$  berechnen.

$$s = \frac{1}{\rho_{\text{Druckfarbe}}} \cdot \frac{(m_{\text{vor}} - m_{\text{nach}})}{A_{\text{Druckform}}} \quad (4.1)$$

Wird die zuvor vorgestellte Vorgehensweise der Druckprobenherstellung eingehalten, kann jeder Druckprobe eine definierte gedruckte Farbschichtdicke zugeordnet werden.

Im Gegensatz zum Offsetdruck lässt sich die gedruckte Farbschichtdicke beim Flexodruck nicht direkt bestimmen. Hier wird mit der Variation bzw. Wahl der

Rasterwalze gearbeitet und die Ergebnisse auf das Schöpfungsvolumen der unterschiedlichen Rasterwalzen zurückgeführt. In Abbildung 4-2 ist das IGT-Bedruckbarkeitsgerät für den Flexodruck und die herangezogenen Rasterwalzen abgebildet. Tabelle 4-1 gibt darüber hinaus eine Definition der Eigenschaften der eingesetzten Rasterwalzen an.

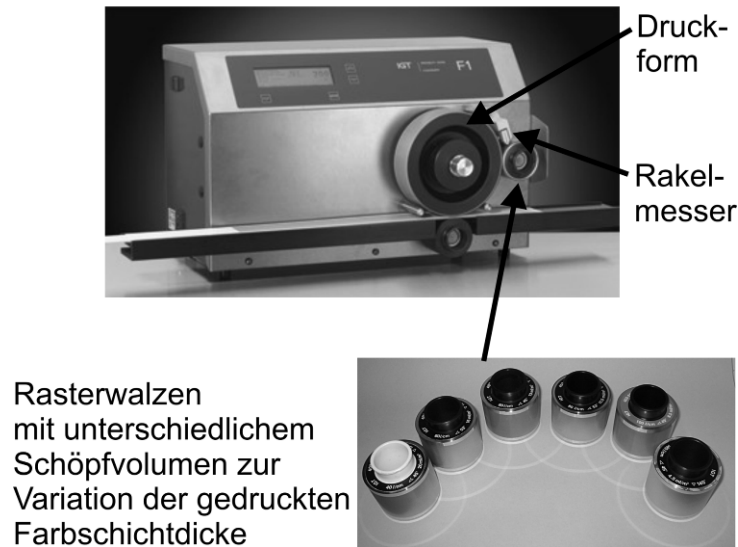


Abbildung 4-2: IGT-Bedruckbarkeitsgerät für den Flexodruck mit austauschbaren Rasterwalzen unterschiedlichen Schöpfungsvolumens zur Variation der gedruckten Farbschichtdicke

Tabelle 4-1: Eigenschaften der für die Flexodruckversuche eingesetzten Rasterwalzen

Bezeichnung	Schöpfungsvolumen in ml/m <sup>2</sup>	Rasterfrequenz in Linien/cm	Stylus in °	Winkel in °
W1	4,5	140	140	45
W2	8,5	100	130	45
W3	11,5	80	130	53
W4	13	80	120	45
W5	16	60	130	53
W6	20	40	140	45

Der Ablauf der Herstellung von Flexodruck-Bedruckbarkeitsproben reduziert sich auf das Aufbringen einer definierten Farbmenge  $m_{\text{Druckfarbe}}$  zwischen Rakelmesser und Rasterwalze. Eine Wägung, wie im Falle des Offsetdrucks ist aufgrund der flüssigen Druckfarbe nicht möglich und entfällt daher.

Durch den Einsatz von Bedruckbarkeitsgeräten zur Herstellung von Druckproben ist es möglich, unter geringem Einsatz von Druckfarbe und Bedruckstoff zu arbeiten. Für den Flexodruck werden in Abhängigkeit der gewählten Rasterwalze ca. 1 - 3 ml und für den Offsetdruck in Abhängigkeit von der gedruckten Farbschichtdicke weniger als 2 g Druckfarbe pro Druckprobe

benötigt. Die Größe des Bedruckstoffs und der Druckfläche ist durch die Abmaße des Bedruckbarkeitsgeräts bestimmt. Für den Flexodruck wird der Bedruckstoff in Form von Streifen einer Länge von 630 mm und einer Breite von 50 mm bereitgestellt. Ferner ergibt sich eine Druckfläche von  $A_{\text{Druckfläche, Flexo}} = (500 \times 40) \text{ mm}^2$ . Im Offsetdruck werden kleinere Bedruckstoffstreifen eingesetzt. Hier liegt die Länge eines Streifens bei 340 mm und einer Breite von 50 mm. Als Druckfläche ergibt:  $A_{\text{Druckfläche, Offset}} = (200 \times 20) \text{ mm}^2$ .

#### 4.1.1 Auswahl der Druckparameter

In Abhängigkeit des Ziels der Probenherstellung stehen bei den Bedruckbarkeitsversuchen folgende veränderliche Parameter zur Verfügung:

- Gedruckte Farbschichtdicke
- Druckfarbe
- Bedruckstoff
- Druckform
- Druckgeschwindigkeit
- Druckspannung

Für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen gedruckter Farbschichtdicke und qualitativen Messwerten zur Prozess- und Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben ist der Parameter „gedruckte Farbschichtdicke“ als Prozessparameter anzusehen. Alle weiteren Parameter (Druckform, Druckfarbe, Bedruckstoff, Druckgeschwindigkeit und Druckspannung) müssen darüber hinaus definiert und während der Probenherstellung konstant gehalten werden.

Für die Probenherstellung in beiden Verfahren wurden sowohl Interferenzeffektfarben als auch Skalenfarben verwendet. Die Skalenfarben dienten insbesondere zur Überprüfung der Bedruckbarkeitsgeräte sowie des Ablaufes der Probenherstellung. Darüber hinaus wurden Ergebnisse der mit Skalenfarben erstellten Druckproben (Offsetdruck) für die Auswertung herangezogen. Des Weiteren erfolgte ein Einsatz der Skalenfarbe Schwarz für Übereinanderdruckversuche im Offsetdruckverfahren.

Für den Offsetdruck erfolgte der Einsatz folgender Druckfarben:

- LithoRed (Perlglanzfarbe OD, Nr. 221446 Firma Huber, München)
- LithoBlue (Perlglanzfarbe OD, Nr. 224226 Firma Huber, München)

- LithoWhite (Perlglanzfarbe OD, Nr. 218395 Firma Huber, München)
- Schwarz (Novavit 100 Firma Flint Group (K+E), Stuttgart)
- Magenta (Novavit 2F 100 Firma Flint Group (K+E), Stuttgart)

Im Flexodruck wurden nachstehende Druckfarben verwendet:

- Perlviolett (T2435761 RW Serie Firma SunChemical, Frankfurt)
- Perlweiß (JB48 Firma SunChemical, Frankfurt)
- Cyan (Kappaflex, Firma Kapp-Chemie, Miehlen)

Den zweiten festzulegenden Parameter stellt der Bedruckstoff dar. Die Probenherstellung erfolgte hauptsächlich auf dem in DIN 16519 vorgegebenen Papier Phoenix Imperial APCO II/II der Firma Scheufelen. Hierbei handelt es sich um ein aufheller- und holzfreies, lichtechtes, glänzend gestrichenes, naturweißes Kunstdruckpapier mit einem Flächengewicht von 150 g/m<sup>2</sup>. Um zusätzlich die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bedruckstoffe zu gewährleisten, wurden weitere Proben auf den nachfolgenden Bedruckstoffen erstellt:

- Kunstdruckpapier, Profigloss der Firma IGEPA: glänzend gestrichen, holzfrei mit einer auffällig hohen Weiße und einem Flächengewicht von 135 g/m<sup>2</sup>.
- Naturpapier, Maxioffset der Firma IGEPA: matt, oberflächengeleimt, holzfrei mit einer angenehmen Weiße und einem Flächengewicht von 80 g/m<sup>2</sup>.
- Zeitungsdruckpapier, aus dem Bestand des Darmstädter Echos; Flächengewicht 50 g/m<sup>2</sup>, weitere Angaben sind unbekannt.

Als Druckform wurde für alle Versuche eine Vollflächendruckform verwendet. Im Falle der Bedruckbarkeitsversuche im Offsetdruck wurde sie in Form einer Aluminiumrolle der Breite 20 mm und einem Durchmesser von 65 mm verwendet. Zur Einhaltung des Druckprinzips „hart gegen weich“ wurde unter dem Bedruckstoff ein Gummituch (CONTI-AIR® CRYSTAL, der Firma Continental CONTITECH) eingesetzt. Bei der Druckform für die Flexodruckversuche handelte es sich um ein flexibles Vollflächenklischee mit einer Dicke von 1,7 mm, einer Länge von 530 mm und einer Breite von 50 mm, welches auf den Druckformzylinder aufgeklebt wird.

Die Festlegung der Einstellung für die Druckgeschwindigkeit und die Druckspannung folgte aus Vorversuchen. Hierzu wurde die in DIN 16519 für Absorptionsfarben vorgeschlagene Vorgehensweise herangezogen. Im

Gegensatz zu den Vorgaben der Norm konnte jedoch für die Beurteilung der mit Interferenzeffektfarben hergestellten Proben der Vorversuche keine Farbmessung eingesetzt werden. In diesem Fall erfolgt die Festlegung der Parameter (Druckgeschwindigkeit und Druckspannung) rein nach visuellen Gesichtspunkten. Die Druckspannung ergibt sich aus der Druckbreite und der am Bedruckbarkeitsgerät gewählten Kraft. Da es sich somit bei der Kraft um den festzulegenden Parameter handelt, wird im Folgenden anstelle der Druckspannung die Druckkraft angegeben.

Während der Vorversuche des Offsetdrucks wurden vier verschiedene gedruckte Farbschichtdicken (1 µm, 2 µm, 3 µm und 5 µm) betrachtet. Die Druckkraft wurde in einem Bereich von 100 N bis 1000 N schrittweise erhöht. Darüber hinaus erfolgte eine Variation der Druckgeschwindigkeit zwischen 0,2 m/s und 2 m/s. Für den Flexodruck wurde eine ähnliche Vorgehensweise gewählt. Hier erfolgte die Betrachtung der Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Rasterwalzen. Zusätzlich zur Druckgeschwindigkeit und der Druckkraft zwischen Druck- und Gegendruckzylinder die Anpresskraft zwischen Rasterwalze und Druckzylinder und die Anzahl der Einfärbungen der Rasterwalze vor der Farbübertragung auf das Klischee gewählt werden. Aus den Vorversuchen gingen die in Tabelle 4-2 aufgeführten Einstellungen hervor.

*Tabelle 4-2: Festgelegte Einstellungen der Bedruckbarkeitsgeräte für die Probenherstellung*

	<b>Bezeichnung der Druckfarbe</b>	<b>Druck- geschwindigkeit in m/s</b>	<b>Druckkraft in N (zwischen Druckform- und Gegendruckzylinder)</b>	<b>Anpresskraft in N (zwischen Rasterwalze und Druckformzylinder)</b>	<b>Anzahl der Einfärbungen der Rasterwalze</b>
Offsetdruck	LithoRed	0,9	640	entfällt	entfällt
	LithoBlue		590		
	LithoWhite		540		
	Schwarz		590		
	Magenta		540		
Flexodruck	Perl violett	1	100	400	4
	Perlweiß				
	Cyan				

Die Vorversuche wurden auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial erstellt und die hieraus ermittelten Festlegungen für die gesamte folgende Probenherstellung auch bei den anderen Bedruckstoffen verwendet.

### 4.1.2 Probenherstellung mittels Bedruckbarkeitsgeräten

Im Rahmen der Probenherstellung wurden Druckproben mit definierter gedruckter Farbschichtdicke in Bedruckbarkeitsversuchen im Offset- und Flexodruckverfahren erstellt. Für den Offsetdruck wird die Variation der gedruckten Farbschichtdicke über die Farbmenge  $m_{\text{Druckfarbe}}$  auf der Einfärbereinheit erreicht. Die gedruckte Farbschichtdicke liegt dabei zwischen  $0,1\ \mu\text{m}$  und  $6\ \mu\text{m}$ . Die Variation der gedruckten Farbschichtdicke erfolgt beim Flexodruck über die Rasterwalzen. Hierbei werden sechs unterschiedliche Rasterwalzen (siehe Tabelle 4-1) eingesetzt. Eine genaue Angabe der gedruckten Farbschichtdicke ist im Flexodruck nicht möglich. Abbildung 4-3 zeigt eine Übersicht über die erstellten Druckproben. Neben den Einzelfarbendruck, die sowohl für den Offset- als auch für den Flexodruck auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial erstellt wurden, sind im Offsetdruck Einzelfarbendrucke auf weiteren Bedruckstoffen und Proben im Übereinanderdruck mit Schwarz hergestellt worden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Abschnitte der Probenherstellung näher eingegangen.

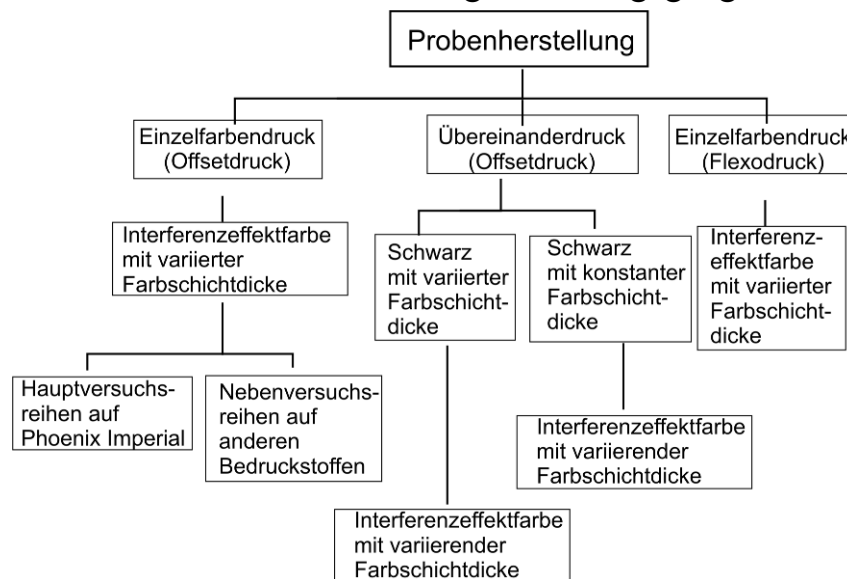


Abbildung 4-3: Übersicht über die Probenherstellung mit den Bedruckbarkeitsgeräten im Offset- und Flexodruckverfahren

Im Einzelfarbendruck wurden sowohl im Offset- als auch Flexodruck Druckproben auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial hergestellt. Im Flexodruck erfolgte die Variation der gedruckten Farbschichtdicke durch die Veränderung der Rasterwalze (W1 bis W6). Mit jeder Rasterwalze wurden zur statistischen Absicherung der Ergebnisse insgesamt fünf Druckproben erstellt. Somit ergibt



sich eine Gesamtanzahl von 30 Druckproben (Einzelfarbendrucke) für den Flexodruck. Im Offsetdruckverfahren wurde eine größere Anzahl von Einzelfarbendrucke (insgesamt ca. 400 Druckproben), welche sich auf Einzelfarbendrucke der Interferenzeffektfarben auf allen vier Bedruckstoffen und auf zusätzliche Einzelfarbendrucke der Skalenfarben Schwarz und Magenta aufteilen. In Abbildung 4-4 ist eine Übersicht für die Hauptversuchsreihen (Bedruckstoff: Phoenix Imperial) und die Nebenversuchsreihen (andere Bedruckstoffe) und die daraus resultierenden Farbschichtdickenbereiche der gedruckten Interferenzeffektfarben dargestellt. Pro Farbschichtdickenbereich wurden ca. 25 Druckproben erstellt.

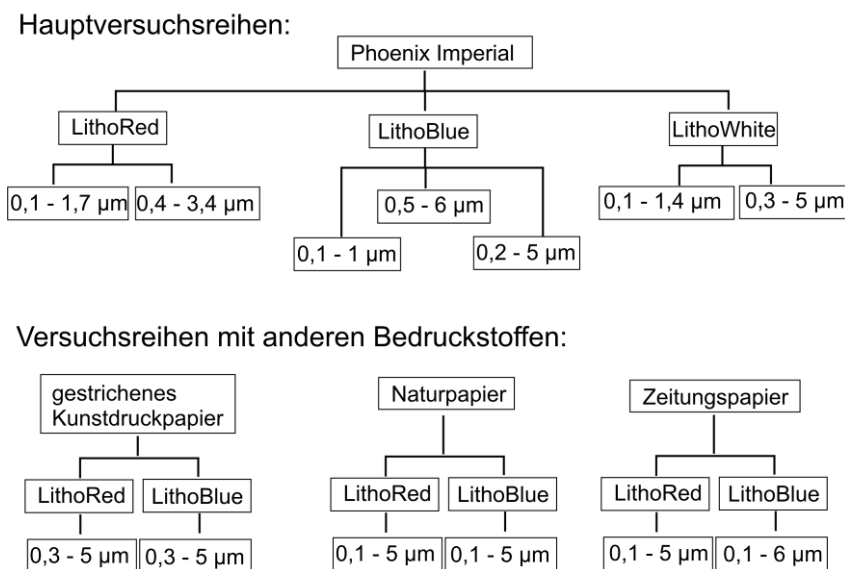


Abbildung 4-4: Übersicht über die erstellten Einzelfarbendrucke der Interferenzeffektfarben im Offsetdruckverfahren und die dabei verwendeten Farbschichtdicken

Im Offsetdruck wurden darüber hinaus Druckproben im Übereinanderdruck erstellt. Im Fall des Übereinanderdrucks wird zunächst die Druckfarbe Schwarz aufgedruckt, über die im gleichen Durchgang, also im Nass-in-Nass-Druck<sup>30</sup>, die Interferenzeffektfarbe übergedruckt wird. Hierzu werden beide Aufnahmen der Druckform genutzt. Es geben sich Druckproben, wie in Abbildung 4-6 am Beispiel des Übereinanderdrucks von Cyan auf Magenta gezeigt. Durch die

<sup>30</sup> Im Nass-in-Nass-Druck wird die zweite Druckfarbe auf die zuerst gedruckte Druckfarbe, ohne das es zur Trocknung der ersten Druckfarbe kommt, gedruckt [RIE89].

Konstruktion des Bedruckbarkeitsgerätes sind bei einem Übereinanderdruck insgesamt drei Druckbereiche gegeben. Im ersten Bereich findet ein Einzelfarbendruck der im Übereinanderdruckbereich unten liegenden Farbe (Schwarz, bzw. in Abbildung 4-5 Magenta), im zweiten Bereich der eigentliche Übereinanderdruck und im dritten Bereich ein Einzelfarbendruck der im Übereinanderdruckbereich oben liegenden Farbe (Interferenzeffektfarbe bzw. in Abbildung 4-5 Cyan) statt.



Abbildung 4-5: Identifizierung der unterschiedlichen Druckbereiche für die Druckproben des Übereinanderdrucks (am Beispiel von Cyan auf Magenta)

Der Übereinanderdruck dienten zum einen dazu Druckproben mit Schwarz konstanter Farbschichtdicke ( $s_{\text{Schwarz}} \approx 1 \mu\text{m}$ ) und zum anderen Druckproben mit Schwarz variierender Farbschichtdicke ( $s_{\text{Schwarz}} \approx 0,1 \mu\text{m}$  bis  $2,5 \mu\text{m}$ ) herzustellen. Pro Versuchsreihe wurden 25 Druckproben erzeugt.

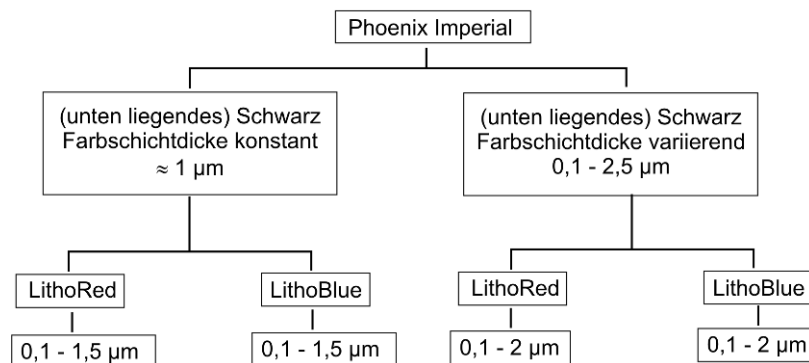


Abbildung 4-6: Überblick über die im Offsetdruck erstellten Druckproben des Übereinanderdrucks mit Schwarz und die dabei verwendeten Farbschichtdicken

### 4.1.3 Zusätzliche Probenherstellung mittels Stufenspaltrakel

Aus den Bedruckbarkeitsversuchen im Offsetdruck gehen Druckproben mit einer maximalen Farbschichtdicke von  $6 \mu\text{m}$  hervor. Im Flexodruckverfahren

können größere, jedoch nicht genau definierte Farbschichtdicken, erzielt werden. Jedoch auch hiermit können keine vergleichbaren Farbschichtdicken erzielt werden, wie sie für die messtechnische Bewertung der Interferenzeffektpigmente (ca. 500  $\mu\text{m}$ ) herangezogen werden. Um auch sehr große, nicht typische Farbschichtdicken, in die Analyse einfließen zu lassen, wurden zusätzliche Proben mittels eines Stufenspaltrakels auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial erstellt. Das Stufenspaltrakel (Abbildung 4-7) verfügt über zehn Stufen zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  mit je einer Breite von 20 mm. Aufgrund der händisch durchgeführten Applikation der Druckfarbe kommt es bei der Nutzung des Stufenspaltrakels zu großen Schwankungen in der Qualität der applizierten Farbschicht. Darüber hinaus ist eine genaue Angabe der aufgetragenen Farbschichtdicke nicht möglich. Es wird sich daher für die erstellten Proben immer auf die Angabe des Spaltes berufen. Für alle Offsetdruck-Interferenzeffektfarben (LithoRed, LithoBlue und LithoWhite) wurden pro Abstufung des Stufenspaltrakels mehrere Druckproben erstellt und aus ihnen die visuell Beste für die anschließende Auswertung ausgewählt. Auf die Betrachtung mehrerer Druckproben wurde aufgrund des nicht exakt reproduzierbaren Prozesses der Applikation der Farbschicht verzichtet.

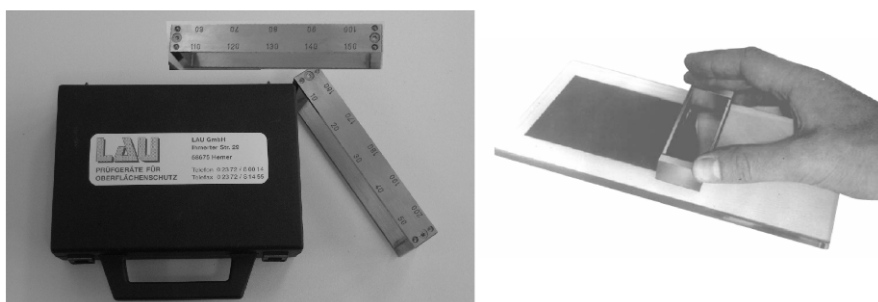


Abbildung 4-7: Applikation einer Farbschicht mit einem Stufenspaltrakel

## 4.2 Auswertung

Für alle erstellten Druckproben wurden nach einer Trocknungszeit von mindestens 24 Stunden Farb- und Dichtemessungen durchgeführt. Hierzu wurden Messgeräte der Druckindustrie, ein Messgerät der Papier-/Textilindustrie mit d/8-Messgeometrie und ein Mehrwinkelspektralfotometer ausgewählt und eingesetzt. Alle Messgeräte zusammengekommen bieten einen umfassenden Überblick über die Messgeräte der heute üblichen Farb- und Dichtemesstechnik. In Tabelle 4-3 sind die für diese Arbeit herangezogenen Messgeräte zusammenfassend dargestellt.

Die Gruppe der Densitometer wird durch drei unterschiedliche Messgeräte repräsentiert. Sie unterscheiden sich zum Einen in ihrer Ausführung (Handmessgeräte: VipDens und Chamäleon; Leitstandsmesssystem: FM19) und zum Anderen in der verwendeten Technologie (Filterdensitometer mit konventionellen Farbfiltern: VipDens und FM19; LED-Technik: Chamäleon). Hierdurch kann die heute verfügbare Vielfalt an Densitometern gut abgedeckt werden.

In Bezug auf die Farbmessung kann ebenfalls auf das Leitstandssystem FM19 zurückgegriffen werden. Dieses Messgerät zeichnet sich durch eine hohe Präzision und Schnelligkeit der Farbmessung bei gleichzeitiger Erfassung der Dichte aus. Darüber hinaus wurde für die Farbmessung das Handgerät SpektroDens eingesetzt. Diese Messgeräte bilden die heute in der Druckindustrie am häufigsten verwendeten Typen ab. Auf die Verwendung eines Inline-Farbmesssystems wurde verzichtet, da sich diese Art der Farbmessung noch im Stadium der Entwicklung befindet.

Tabelle 4-3: Übersicht der für diese Arbeit verwendeten Farb- und Dichtemessgeräte

Instrument (Name, Hersteller)	Anwendungs- gebiet	Messprinzip	Messgeometrie	Größe der Mess- öffnung
<b>VipDens C9</b> Viptronic	Handmessgerät  Densitometer (Filterdensitometer)	Beleuchtung über eine Glühlampe, in den Strahlengang integrierte Polarisationsfilter, Farbfilter für die Skalenfarben CMY	45°/0°	Ø 3 mm
<b>Chamäleon</b> Koeth Electronics	Handmessgerät  Densitometer (LED-Beleuchtung)	Beleuchtung über drei auf die Skalenfarben CMY abgestimmten farbige LEDs, in den Strahlengang integrierte Polarisationsfilter	0°/45°	Ø 3 mm
<b>SpectroDens</b> Techkon	Handmessgerät  Spektralfotometer mit integrierter Farbdichte- messfunktion (Spektralfotometer)	Beleuchtung über eine Glühlampe, Monochromator: Beugungsgitter mit 10 nm Bandbreite, Zuschaltbare Polarisationsfilter für die Farbdichte-messung	45°/0°	Ø 3 mm
<b>FM19</b> Grapho Metronic	Leitstands-messsystem  separate Messung der Farbe über ein Spektralfotometer und der Farbdichte über ein Filter- densitometer	Beleuchtung jeweils über eine Glühlampe Spektralfotometer: Beugungsgitter mit 10 nm Bandbreite als Monochromator; Filterdensitometer: auf die Skalenfarben CMY abgestimmte Farbfilter und in den Strahlengang integrierte Polarisationsfilter	45°/0°	Ø 2 mm
<b>CM2600d</b> (SCI / SCE) Minolta	Handmessgerät  Farbmessgerät (Spektralfotometer mit Kugelgeometrie)	Beleuchtung über drei gepulste Xenonblitzlampen, Monochromator: Beugungsgitter mit 10 nm Bandbreite	d/8, SCI (Messung ohne Glanzfall) SCE (Messung mit Glanzfall)	Ø 8 mm
<b>Multi FX10</b> Datacolor	Laborgerät  Mehrwinkelfarbmessgerät (Mehrwinkel- spektralfotometer)	Beleuchtung über eine Halogenlampe, Monochromator: Beugungsgitter mit 10 nm Bandbreite	10 unterschiedliche Messgeometrien 65°/-80° (as-15), 65°/-50° (as15), 45°/-60° (as-15), 45°/- 30° (as15); 15°/-30° (as-15), 15°/0° (as15), 45°/-20° (as25), 45°/0° (as45), 45°/30° (as 75), 45°/65° (as110)	65 x 22 mm

Neben den in der Druckindustrie üblichen Messgeräten wird das Handmessgerät CM2600d, ein Spektralfotometer mit d/8-Kugelmessgeometrie und das Mehrwinkelspektralfotometer FX10 eingesetzt. Aufgrund der Besonderheit des FX10 wird an dieser Stelle kurz auf die Realisierung der unterschiedlichen Messgeometrien eingegangen. Eine ausführliche Beschreibung und Analyse des Mehrwinkelspektralfotometers wurde durch Hupp [HUP06] gegeben. Das FX10 zeichnet sich durch die Möglichkeit zur Farbmessung in zehn unterschiedlichen Messgeometrien aus. Dies wird über eine paarweise Anordnung einer Beleuchtungs- und einer Messoptik auf einer verschiebbaren Halbpipeline realisiert.

Hierdurch ist es möglich, die von der ASTM vorgeschlagenen Messgeometrien reproduzierbar einzustellen. Abbildung 4-8 a) zeigt eine Fotografie des geöffneten Messgerätes. Abbildung 4-8 b) ist die Anordnung der Beleuchtungs- und Messoptiken auf der verschiebbaren Halfpipe zu entnehmen.

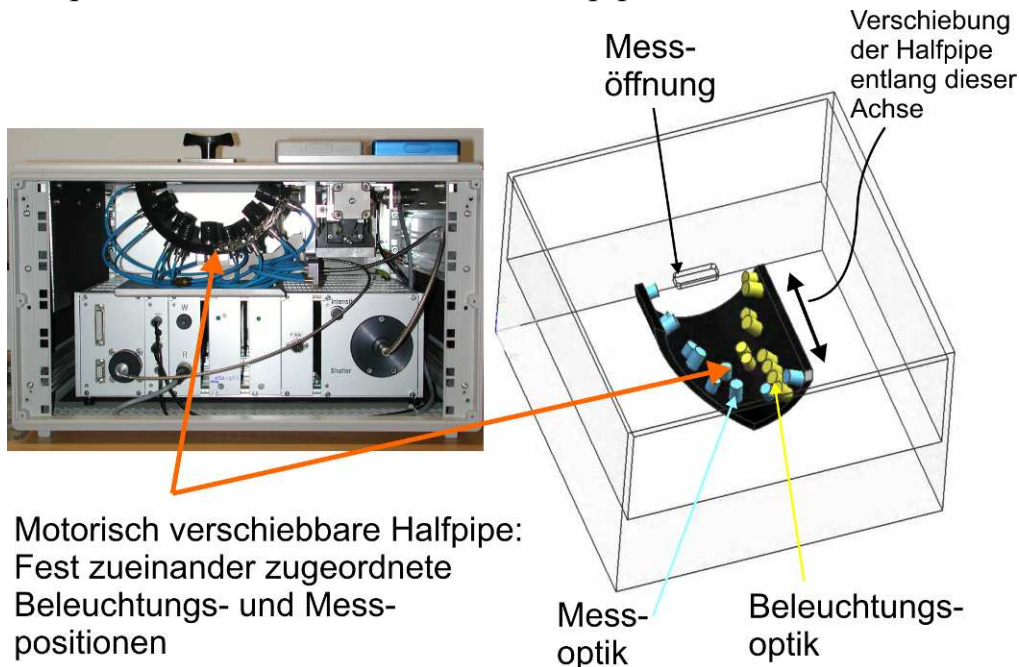
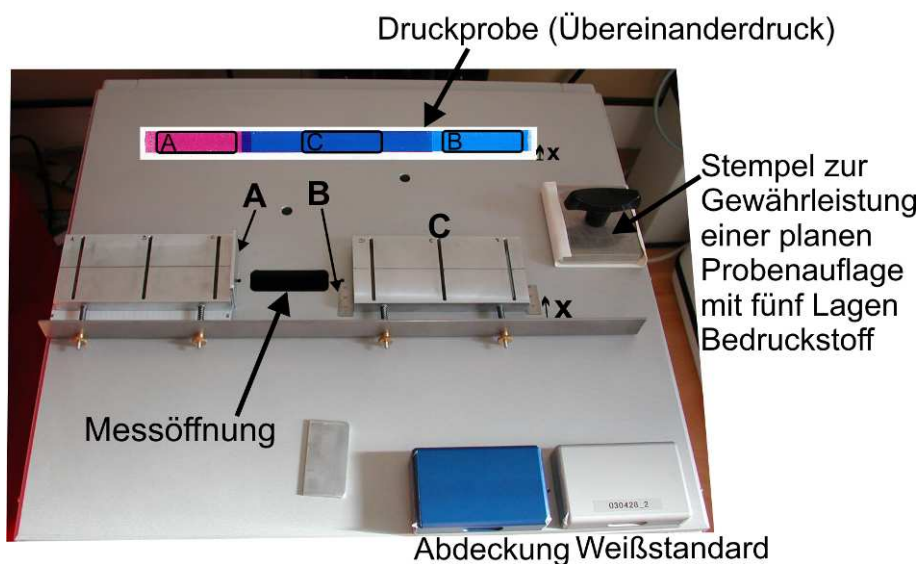


Abbildung 4-8: a) Fotografie des offenen Mehrwinkelspektrofotometers FX10 (links).  
b) 3D-Prinzipdarstellung des Gehäuses mit Messöffnung und der in dem Gehäuse befindlichen Halfpipe (rechts)

Alle Messgeräte stellen unterschiedliche Messbedingungen und insbesondere Messfeldgrößen zur Verfügung. Daher wurden Anlageschablonen und Vorrichtungen zur Vereinheitlichung der Messung angefertigt. Die Festlegung der Messpositionen folgte aus den Gegebenheiten der Druckproben (insbesondere des Übereinanderdrucks) und des Messgerätes FX10, welches im Vergleich zu den anderen Messgeräten über eine sehr große Messöffnung (65 x 22 mm) verfügt. Wie aus Abbildung 4-5 hervorging, ergeben sich für die Druckproben des Übereinanderdrucks drei Druckbereiche: Einzelfarbe der unten gedruckten Farbe (Schwarz), Übereinanderdruckbereich und ein Bereich der Einzelfarbe der aufgedruckten Interferenzeffektfarbe. Da alle drei Bereiche messtechnisch erfasst werden sollten, war ein definierter Zuschnitt der Druckproben und eine Festlegung von drei Messpositionen notwendig. Abbildung 4-9 zeigt die Realisierung definierter Messpositionen durch eine auf dem Messgerät FX10 angebrachte Vorrichtung. Da aufgrund des Druckprozesses leichte Verschiebungen der Position des Druckfeldes in x-

Richtung auftreten, ist neben der Probenanlage (Position A, B und C) eine Möglichkeit zur Positionierung der Probe in x-Richtung vorgesehen, sodass die Druckfläche immer oberhalb der Messöffnung zu liegen kommt. In Messposition A erfolgt, im Gegensatz zu den Positionen B und C, die Anlage des linken Endes der Druckprobe (Seite des untergedruckten Schwarz). In den Positionen B und C erfolgt die Anlage des rechten Endes der Druckprobe.

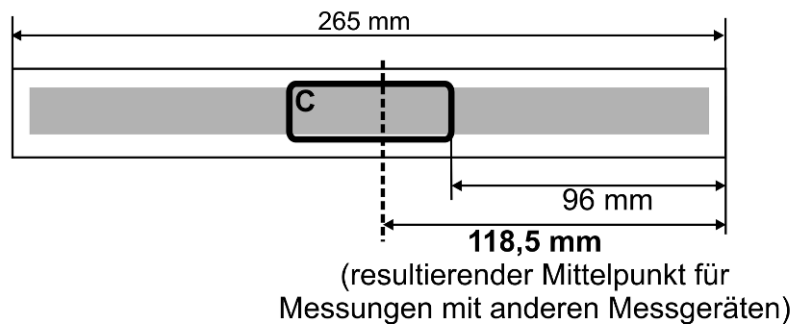


*Abbildung 4-9: Draufsicht auf die Messöffnung des FX10 und die zur Positionierung der Druckproben verwendete Vorrichtung. Angabe der verwendeten Probenanlage zur Positionierung der Druckproben des Einzelfarbendrucks (E) und des Übereinanderdrucks (C-, D- und E).*

Aus den Messpositionen des FX10 wurden im Folgenden die Mittelpunkte der Messungen mit anderen Messgeräten ermittelt. Abbildung 4-10 zeigt die Messpositionen a) für den Einzelfarbendruck und b) für den Übereinanderdruck am Beispiel einer Schemadarstellung der Druckproben. Die gestrichelte Linie resultiert aus der Analyse des FX10 [HUP06], welche eine optimale Messstelle innerhalb der Messöffnung des FX10 im Abstand von 22,5 mm (vom rechten Rand der Messöffnung) identifizierte.

**a) Messposition des Einzelfarbendrucks:**

Beim Einzelfarbendruck erfolgt die Anlage in Messposition **C**

**b) Messpositionen des Übereinanderdrucks:**

Beim Einzelfarbendruck erfolgt die Anlage in der Messposition **A** zur Ermittlung der Farb- und Dichtewerte des (untergedruckten) Schwarz. In Messposition **C** für den Übereinanderdruckbereich und in Messposition **B** für die (aufgedruckte) Interferenzeffektfarbe.

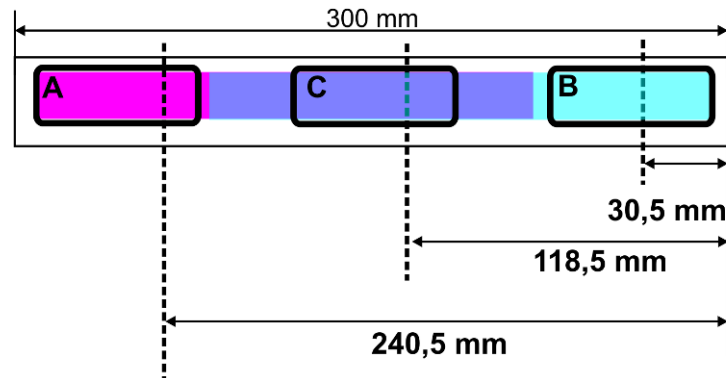


Abbildung 4-10: Schemadarstellung der Druckproben a) des Einzelfarbendrucks und b) des Übereinanderdrucks. Kennzeichnungen der Messpositionen des FX10 (C-, E und D) sowie der aus diesen Messpositionen abgeleiteten Mittelpunkte für die Messung mit anderen Messgeräten.

Für die Messungen mit den Handmessgeräten wurde eine Anlageschablone (siehe Abbildung 4-11) erstellt, die eine exakte Auflage und Positionierung der Druckproben und der damit verbundenen Messpositionen ermöglichte. Bei dem Leitstandsmesssystem FM19 konnte eine direkte Zuordnung der Messwerte zur Messposition über die Messdatei erfolgen (Abbildung 4-12).



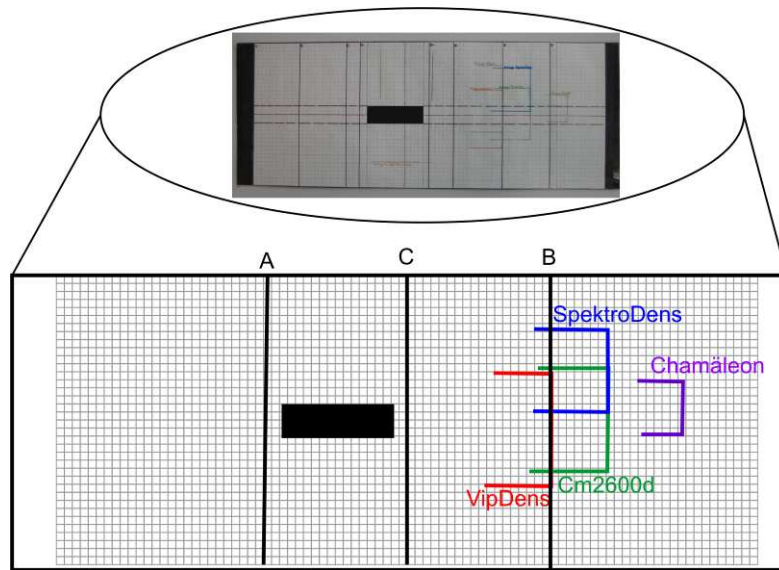


Abbildung 4-11: Fotografie der verwendeten Messschablone (oben). Unten dargestellt ist eine vergrößerte Skizze der verwendeten Messpositionen der einzelnen Handmessgeräte.



Maßstab zur direkten Zuordnung der Messwerte zur Messposition

Abbildung 4-12: Messpositionen können beim Messgerät FM19 direkt den Messwerten über den anliegenden Maßstab direkt zugeordnet werden.

Die Auswahl nur einer Messposition für den Einzelfarbendruck bzw. drei Messpositionen für den Übereinanderdruck resultierte aus einer Untersuchung der Druckproben über der Drucklänge und Druckbreite von mit Absorptionsfarben erstellten Druckproben mittels FM19. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen der ermittelten Farbwerte zwischen Druckanfang (unter Ausschluss des Anfahrsbereiches, siehe Abbildung 4-13) und Druckende mit  $\Delta E_{ab} < 2$  und die der Dichte  $D < 0,08$  angegeben werden

können. Für den Übereinanderdruck ergaben sich in den einzelnen Bereichen Veränderungen im gleichen Größenbereich wie für den Einzelfarbendruck.

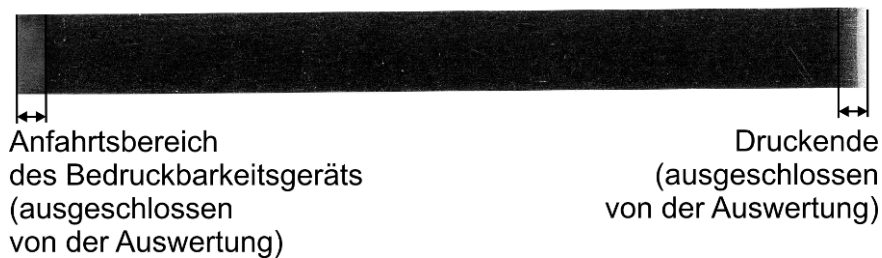


Abbildung 4-13: Beispiel einer Druckprobe des Einzelfarbendrucks. Markierung des Anfahrtsbereichs und des Druckendes bei den Druckproben des Offset-Bedruckbarkeitsversuchs (Druckfarbe Schwarz mit einer gedruckten Farbschichtdicke von  $s \approx 1 \mu\text{m}$ )

Neben der Festlegung der Messpositionen wurde vor der Auswertung der Druckproben eine Überprüfung der von den Herstellern angegebenen Wiederholgenauigkeit durchgeführt. Wie in Tabelle 4-4 dargestellt, ergibt sich für alle Messgeräte mit einer Ausnahme eine gemessene Wiederholgenauigkeit kleiner als die durch den Hersteller angegebene Messgenauigkeit. ( $\Delta E_{\text{ab,Hersteller}} > \Delta E_{\text{ab,max Wiederholmessung}}$ ).

Tabelle 4-4: Messgenauigkeit der zur Auswertung verwendeten Messgeräte angegeben in  $\Delta E_{\text{ab}}$  des CIELAB-Farbsystems (Herstellerangabe im Vergleich zur Wiederholmessung des Weißstandards)

Messgerät	$\Delta E_{\text{ab,Hersteller}}$	$\Delta E_{\text{ab,max Wiederholmessung}}$	
Techkon:	0,3	0,211	
FX10:	0,15	2,5 (mit Mess- ausreißern)	0,096 (unter Ausschluß von Messausreißern)
Minolta_SCE:	0,04	0,022	
Minolta_SCI:	0,04	0,014	
FM19:	0,25	0,099	

Bereits in [HUP06] wurde dargestellt, dass sich bei einer Wiederholmessung in unterschiedlichen Messgeometrien Fehlmessungen ereignen. Diese führen zu dem in Tabelle 4-4 angegebenen Farbabstand  $\Delta E_{\text{ab,max Wiederholmessung}} = 2,5$ . Werden sie aus der Betrachtung ausgeschlossen, kann ein deutlich kleinerer Farbabstand von  $\Delta E_{\text{ab,max Wiederholmessung}} = 0,096$  ermittelt werden. Um für die folgende Auswertung Fehlmessungen auszuschließen, wurde eine dreimalige Wiederholung der Messung pro Druckprobe und Messposition durchgeführt und

durch einen Vergleich der Messergebnisse eine repräsentative Messung ausgewählt, siehe auch [HUP06]. Für alle anderen Messungen hingegen kann, aufgrund der gegebenen Wiederholgenauigkeit auf Wiederholmessungen verzichtet werden.

Den letzten Schritt der Auswertung stellt die Berechnung der für die Analyse benötigten Messwerte der Dichte, der Dichtekurve bzw. spektralen Dichte und der CIELAB-Farbwerte ( $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ ) dar. Um eine einheitliche Berechnung der CIELAB-Farbwerte zu erzielen, werden die von den Farbmessgeräten ermittelten Remissionskurven  $\beta(\lambda)$  in eine gemeinsame Excel-Berechnungsdatei übertragen. Hierin sind die in Kapitel 2.3.2 dargestellten Gleichungen zur Berechnung der CIEXYZ-Farbwerte und daraus der CIELAB-Farbwerte implementiert. Für die Auswertung wurde dabei der 2°-Normbeobachter und die Normlichtart D50 gewählt. Darüber hinaus wird die Excel-Berechnungsdatei zur Ermittlung der Dichtekurve  $D(\lambda)$ , der spektralen Dichte  $D_\lambda$  und der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$ ,  $D_K$ ) benutzt. Lediglich für die Filterdensitometer werden die Messwerte direkt aufgezeichnet.

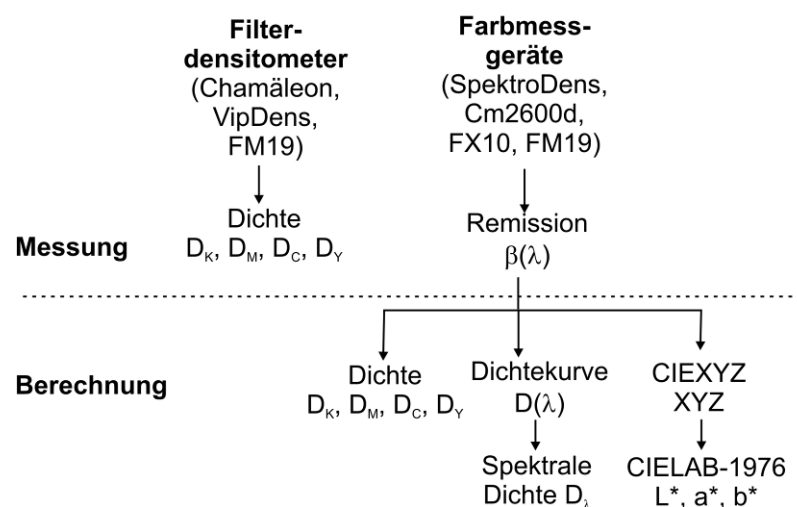


Abbildung 4-14: Ablauf der Auswertung der Druckproben. Aus der Messung der Filterdensitometer werden direkt die Messwerte der Dichte abgelesen. Bei allen Farbmessgeräten erfolgt die Messung der Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  aus der nachfolgend die Dichte, Dichtekurve und CIELAB-Farbwerte berechnet wird.

## 5 Messgeometrien zur Qualitätskontrolle

Das vorliegende Kapitel wird dazu verwendet, aus den Ergebnissen der Druckversuche und eines entwickelten theoretischen Modells, die für die Qualitätskontrolle notwendigen Messgeometrien abzuleiten. In einem ersten Schritt erfolgt die Darstellung der durch das Mehrwinkelspektralfotometer FX10 ermittelten Ergebnisse von den Messungen der Einzelfarbendrucke. In einem zweiten Abschnitt wird ein theoretisches Modell zur Beschreibung der Farbwirkung von Interferenzeffektfarben in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke dargestellt. Aus den Erfahrungen beider Betrachtungen werden anschließend die zur Qualitätskontrolle einer gedruckten Interferenzeffektfarbe notwendigen Messgeometrien abgeleitet. Abgerundet werden die Ausführungen zur Qualitätskontrolle durch die Klärung der Frage bezüglich der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Druckverfahren am Beispiel des Flexodrucks.

### 5.1 Ergebnisse der Druckversuche

Für die Qualitätskontrolle muss eine Messung der Farbwirkung mittels Farbmessgeräten (z. B. Spektralfotometer oder Dreibereichsmessgeräte) erfolgen. Hierzu werden in der Druckindustrie Messgeräte mit einer  $45^\circ/0^\circ$ - bzw.  $0^\circ/45^\circ$ - Messgeometrie eingesetzt. In Bezug auf gedruckte Interferenzeffektfarben bringt dies die Schwierigkeit, dass mit der gegebenen Messgeometrie nur eine Geometrie mit einem Beobachtungswinkel weit entfernt vom Glanz zur Verfügung steht. Hierdurch kann jedoch nicht die Interferenzeffektfarbe erfasst werden. Aus diesem Grund wurden für andere Branchen (z. B. für die Qualitätskontrolle der Pigmentherstellung) Mehrwinkelspektralfotometer entwickelt, die eine Messung mittels unterschiedlicher Messgeometrien erlauben. Eine direkte Nutzung dieser Messgeräte für die Druckindustrie ist aufgrund der Größe der Messöffnung und des zeitintensiven Messvorgangs nicht möglich (siehe [HUP06]).

Zur Klärung der Fragen bezüglich notwendiger Messgeometrien zur Qualitätskontrolle werden die Messergebnisse des Mehrwinkelspektralfotometers FX10 für Druckproben unterschiedlicher Interferenzeffektfarben auf verschiedenen Bedruckstoffen betrachtet. Teilergebnisse zu diesem Aspekt wurden bereits in [HUP07a] und [HUP07b] vorgestellt.

In [HUP07a] wurden Ergebnisse bezüglich des Verhaltens gedruckter Interferenzeffektfarben auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II vorgestellt. Hierbei wurden die beiden Interferenzeffektfarben LithoRed und LithoBlue für unterschiedlich gedruckte (0,1 bis 6  $\mu\text{m}$ ) und applizierte (10 bis 200  $\mu\text{m}$ ) Farbschichtdicken mittels des FX10 spektralfotometrisch in den zehn zur Verfügung stehenden Messgeometrien gemessen. Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgte anschließend sowohl in der  $a^*/b^*$ -Farbebene als auch über den Farbabstand  $\Delta E^*_{ab}$ . In [HUP07b] erfolgte dann eine erweiterte Betrachtung für den Druck von Interferenzeffektfarben auf anderen Bedruckstoffen. Hier wurde exemplarisch das Verhalten der Interferenzdruckfarbe LithoRed in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke und der betrachteten Messgeometrien auf unterschiedlichen Bedruckstoffen ausführlich dargestellt. An dieser Stelle werden die Teilergebnisse beider Veröffentlichungen zusammengeführt und die wichtigsten Gesichtspunkte vorgestellt.

Zur Identifizierung und Bewertung von Interferenzpigmenten wurde durch Cramer und Gabel eine Auftragung der Farbkoordinaten als „Interferenzlinie“ („interference line“) und Glanzlinie („aspecular line“) vorgeschlagen. Die Interferenzlinie enthält dabei die Ergebnisse der Farbmessung bei variierter Beleuchtung aber konstantem Aspektwinkel<sup>31</sup>. Bei der Glanzlinie ist der Einfallswinkel der Beleuchtung konstant und der Aspektwinkel zum Glanzwinkel variabel [CRA06], [CRA03c] und [CRA01a]. Diese Darstellung wird zunächst auch für die Identifikation der Abhängigkeit von der gedruckten Farbschichtdicke von Interferenzeffektfarben verwendet. Zur Verdeutlichung werden die Interferenzlinie (Abbildung 5-1) und die Aspektlinie (Abbildung 5-2) am Beispiel einer mit  $s \approx 200 \mu\text{m}$  dicken Farbschicht der Interferenzeffektfarbe LithoRed mit den dazugehörigen Messgeometrien des FX10 dargestellt. Wie von Cramer und Gabel vorgeschlagen [CRA01b] werden die Messpunkte durch Linien verbunden.

---

<sup>31</sup> Als Aspektwinkel wird der Differenzwinkel  $\gamma$  zwischen Beobachtungsrichtung und Glanzwinkel bezeichnet.

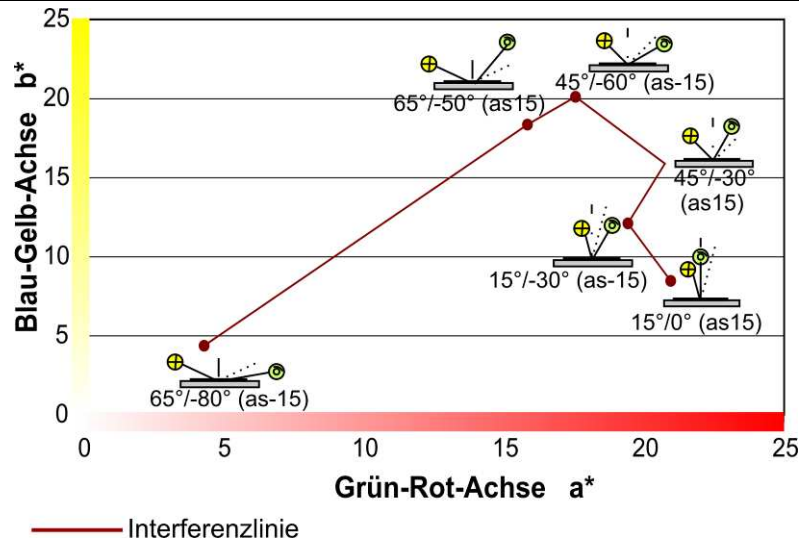


Abbildung 5-1: Interferenzlinie der Interferenzeffektfarbe LithoRed mit einer auf den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II applizierten Farbschichtdicke von ca.  $200\ \mu\text{m}$

Durch die Interferenzlinie werden die Messergebnisse der CIELAB- $a^*/b^*$ -Ebene der Messgeometrien  $65^\circ/-80^\circ$  (as-15),  $65^\circ/-50^\circ$  (as15),  $45^\circ/-60^\circ$  (as-15),  $45^\circ/-30^\circ$  (as15),  $15^\circ/-30^\circ$  (as-15) und  $15^\circ/0^\circ$  (as15) miteinander verbunden, (siehe Abbildung 5-1). Sie ist in der Literatur, z. B. [CRA01a] und [PFA07a] durch einen durchgezogenen Linienzug gekennzeichnet. Es zeigt sich schon hier, dass sich die Messergebnisse der Messgeometrie  $65^\circ/-80^\circ$  (as-15) deutlich von den anderen Messergebnissen der Interferenzlinie unterscheidet. Dies ist auf die sehr flachen Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel zurückzuführen. Hierdurch kommt es zu einer erhöhten Beobachtung von Reflexionseffekten<sup>32</sup> an der Oberfläche [POH63], welche der eigentlich erwünschten Beobachtung der Farbwirkung überlagert werden. Infolge dessen ergibt sich ein von der Interferenzfarbe unabhängiger, unbunter und gegenüber den anderen Messgeometrien deutlich dunklerer Farbeindruck. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurde die Messgeometrie  $65^\circ/-80^\circ$  (as-15) nicht im Normentwurf der ASTM von 2006 zur Charakterisierung von Interferenzpigmenten [ASTM WK 1164] aufgenommen. Für die folgenden Ausführungen bleibt die Messgeometrie  $65^\circ/-80^\circ$  (as-15) unberücksichtigt. Es ergeben sich somit zur Beschreibung der Interferenzlinie fünf Messgeometrien.

<sup>32</sup> Bei einem flacher werdenden Einstrahlwinkel nimmt die Reflexion deutlich zu. Bei einem Einstrahlwinkel  $\varepsilon_l = 90^\circ$  ergibt sich für den Reflexionsgrad  $R(\varepsilon_l = 90^\circ) = 1$  [DEM04].

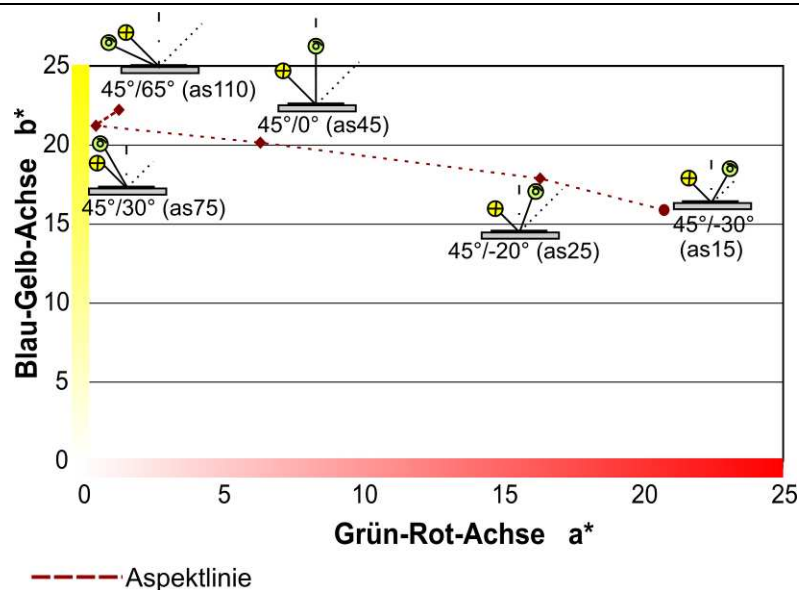


Abbildung 5-2: Aspektlinie der Interferenzeffektfarbe LithoRed mit einer auf den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II applizierten Farbschichtdicke von ca. 200  $\mu\text{m}$

Die Aspektlinie beschreibt das Verhalten eines Interferenzpigments bzw. der Interferenzeffektfarbe bei gleichbleibenden Beleuchtungsbedingungen (Einstrahlwinkel:  $45^\circ$ ) und veränderten Beobachtungsbedingungen. So wird der Effekt nahe am Glanz (z. B. as15) und weit weg vom Glanz (z. B. as110) festgestellt. Hierbei werden ausschließlich die cis-Stellungen (+) betrachtet. Aufgrund dessen wird die Messgeometrie  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) in diesem Zusammenhang ein weiteres Mal aufgeführt. Die Kennzeichnung der Aspektlinie erfolgt durch einen gestrichelten Linienzug.

Die zuvor dargestellten Verläufe der Interferenz- und Aspektlinie wurden für eine sehr große, aber im Druck unerreichbare Farbschichtdicke von  $s \approx 200 \mu\text{m}$ , ermittelt. Es stellt sich nun die Frage, ob sich ein solches Verhalten auch für kleinere, drucktypische Farbschichten einstellt und ab welcher Farbschichtdicke sich eine gleichbleibende Farbwirkung der Interferenzeffektfarben einstellt. In den folgenden Darstellungen wird auf eine getrennte Darstellung der Interferenz- und Aspektlinie verzichtet. Wie bereits in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 eingeführt, wird die Interferenzlinie mit einem durchgezogenen Linienzug, die Aspektlinie mit einem gestrichelten Linienzug versehen.

In Abbildung 5-3 ist das Verhalten der Interferenzeffektfarben LithoRed (Abbildung 5-3 a)) und LithoBlue (Abbildung 5-3 b)) bei einer Applikation der Druckfarbe auf dem Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II dargestellt. Wie aus Abbildung 5-3 hervorgeht, kommt es zu einer deutlichen Verschiebung der Interferenz- und der Aspektlinie in Abhängigkeit der aufgetragenen Farbschichtdicke.

Werden zunächst die Ergebnisse für große Farbschichtdicken (90  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$ ) betrachtet, befindet sich für LithoRed die Interferenzlinie im ersten Quadranten ( $+a^*$  und  $-b^*$ ). Hierdurch wird im CIELAB-Farbsystem eine rötlich/orange Farbe angezeigt. Dieser Farbeindruck ändert sich bei einer Betrachtung mit zunehmendem Differenzwinkel zum Glanz (Aspektlinie) zu einem rein gelben Farbeindruck (Lage auf der  $+a^*$ -Achse). Bei einer visuellen Betrachtung dieser Probe müsste somit ein Farbflop<sup>33</sup> von einem rötlichen orange zu einem Gelb erfolgen. Für LithoBlue kann anhand der Messergebnisse ebenfalls ein Farbflop in Richtung Gelb (leicht rötlich) festgestellt werden. Hier befindet sich für große Farbschichtdicken (90  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$ ) die Interferenzlinie im dritten und vierten Quadranten des  $a^*/b^*$ -Koordinatensystems. Diese Lage weist auf eine bläuliche Farbe hin. In Abhängigkeit der Messgeometrie wird dem Blau ein leicht rötlicher ( $+a^*$ ) oder leicht grünlicher Farbeindruck ( $-a^*$ ) überlagert. Anhand dieser Abbildung ist es schwer das Verhalten von kleinen und mittleren Farbschichtdicken zu beurteilen, daher werden in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 diese Farbschichtdickenbereiche nochmals genauer dargestellt.

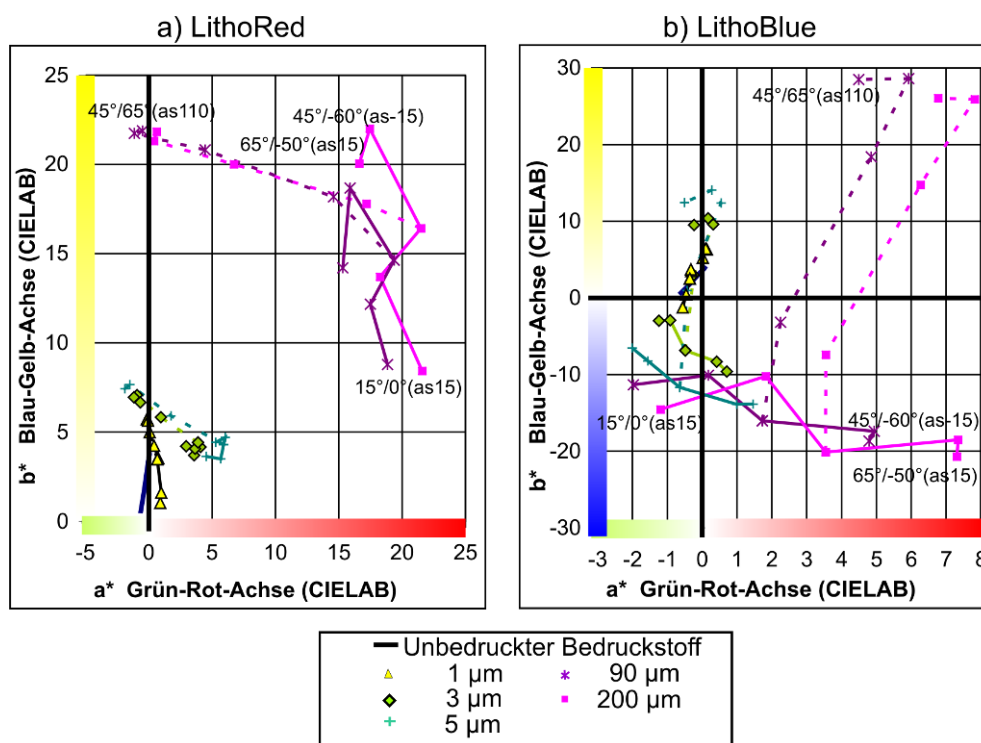


Abbildung 5-3: Verhalten gedruckter und applizierter Interferenzeffektfarben, a) LithoRed und b) LithoBlue, entlang der Interferenzlinie (durchgezogene Linie) und der Aspektlinie (gestrichelte Linie) am Beispiel unterschiedlicher Farbschichtdicken; Bedruckstoff: Phoenix Imperial APCO II/II

<sup>33</sup> Unter einem Farbflop wird eine visuell sichtbare Veränderung der Farbwirkung in Abhängigkeit des Beobachtungs- und/oder Beleuchtungswinkels verstanden.



Für kleine Farbschichtdicken  $s \leq 1 \mu\text{m}$  ergibt sich im Vergleich zur Interferenz- und Aspektlinie des Bedruckstoffs nur eine leicht veränderte Lage der Messergebnisse für die gedruckten Farbschichtdicken. Dies ist insbesondere für LithoBlue (Abbildung 5-4 b)) festzustellen, da sich hier die Verläufe bis zu einer Farbschichtdicke  $s \approx 1,6 \mu\text{m}$  gleichen. Für LithoRed ergibt sich bereits ab einer Farbschichtdicke von  $s \approx 1 \mu\text{m}$  ein deutlich anderes Verhalten als für den Bedruckstoff. Hier ist in Bezug auf die Interferenzlinie eine deutliche Verschiebung in Richtung Rot ( $a^* \approx +2$ ) festzustellen.

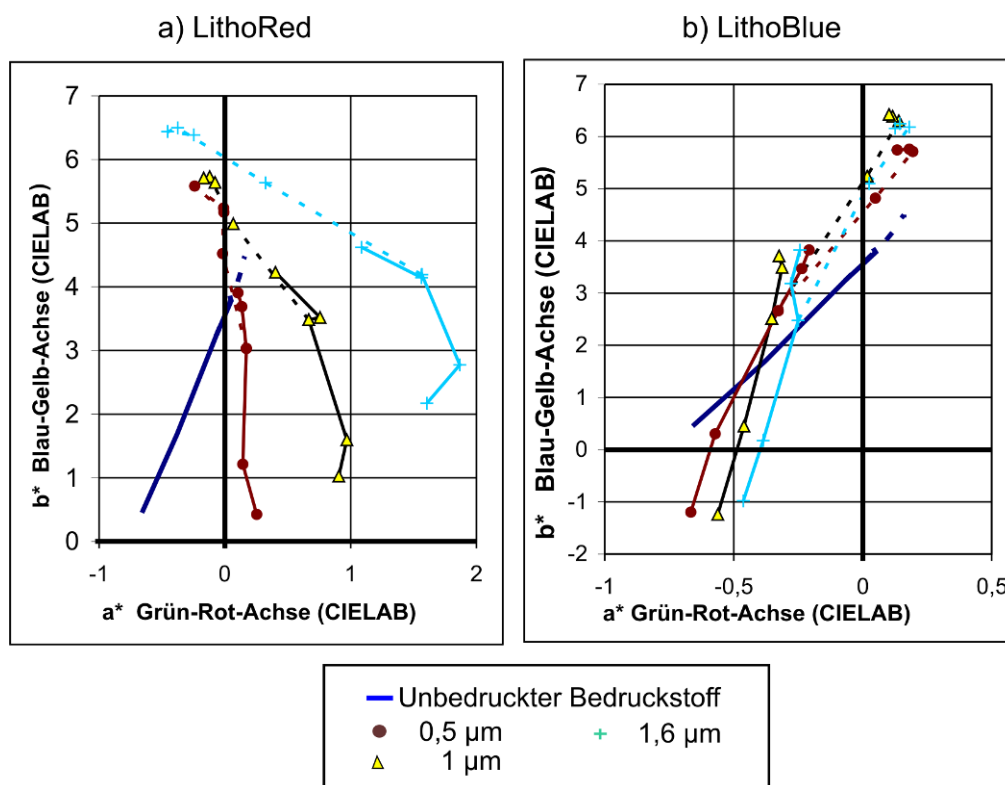


Abbildung 5-4: Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben, a) LithoRed und b) LithoBlue, im kleinen Farbschichtdickenbereich (am Beispiel der gedruckten Farbschichtdicken:  $s \approx 0,5 \mu\text{m}$ ,  $s \approx 1 \mu\text{m}$  und  $s \approx 1,6 \mu\text{m}$ ); Bedruckstoff: Phoenix Imperial APCO II/II

Für LithoBlue zeigt sich der Einfluss der Interferenzpigmente erst ab einer gedruckten Farbschichtdicke von ca.  $2 \mu\text{m}$  (Abbildung 5-5 b)). Dieser Einfluss wird mit zunehmender gedruckter Farbschichtdicke immer deutlicher. Der zunehmende Einfluss der Interferenzpigmente an der Farbwirkung ist auch bei LithoRed festzustellen (Abbildung 5-5 a)).

In Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke ist neben der Veränderung der Lage der Interferenzlinie, bei einer Betrachtung entlang der Aspektlinie eine Zunahme in Richtung gelblichen Farbeindrucks wahrzunehmen.

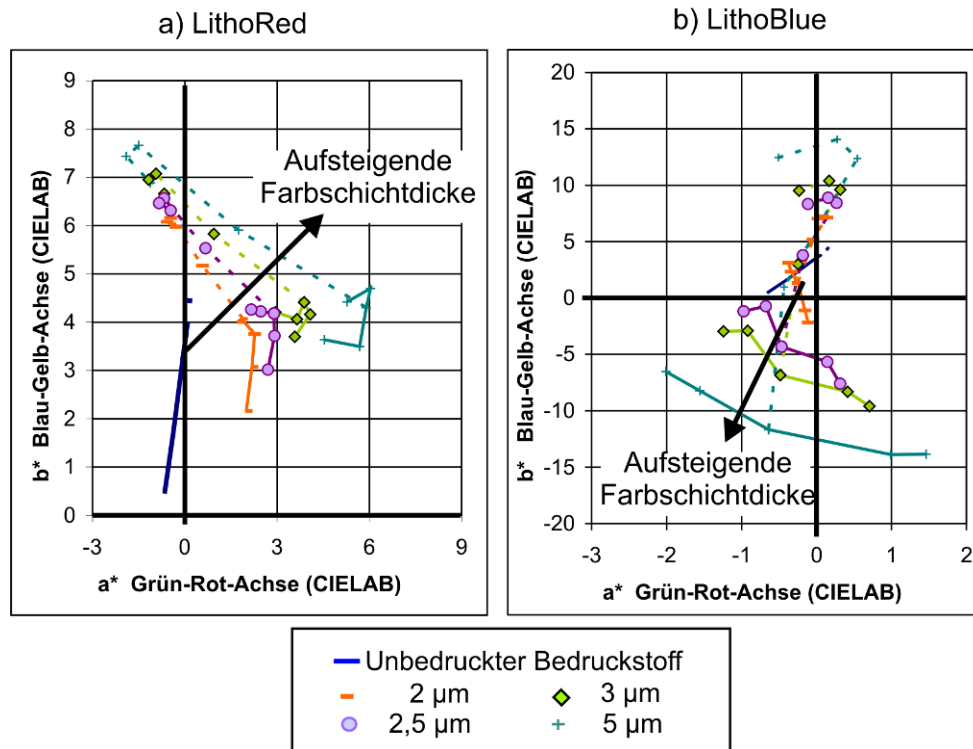


Abbildung 5-5: Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben, a) LithoRed und b) LithoBlue, im mittleren Farbschichtdickenbereich (am Beispiel der gedruckten Farbschichtdicken:  $s \approx 2 \mu\text{m}$ ,  $s \approx 2,5 \mu\text{m}$ ,  $s \approx 3 \mu\text{m}$  und  $s \approx 5 \mu\text{m}$ ); Bedruckstoff: Phoenix Imperial APCO II/II

Die Beschreibung einer Farbwirkung erfolgt in der Farbmeterik immer anhand drei voneinander unabhängigen Attributen (z. B. Helligkeit, Buntheit und Buntton oder im CIELAB-Farbsystem  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ ). Daher muss neben den oben beschriebenen Farbwerten  $a^*$  und  $b^*$  zusätzlich die Helligkeit  $L^*$  betrachtet werden. In Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 ist am Beispiel der Interferenzeffektfarbe LithoRed die Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke und der Messgeometrie dargestellt. Für die Messgeometrien mit einer Beobachtung nahe des Glanzes ( $as \pm 15$ ) ergibt sich mit zunehmender Farbschichtdicke im kleinen und mittleren Farbschichtdickenbereich eine deutliche Zunahme der Helligkeit  $L^*$  (vgl. Abbildung 5-6 b)). Für sehr große Farbschichtdicken  $s > 50 \mu\text{m}$  ist tendenziell wieder eine Abnahme in der Helligkeit  $L^*$  feststellbar (vgl. Abbildung 5-6 a)). Die größte Veränderung zeigt sich für die Messgeometrie  $65^\circ/-50^\circ$  ( $as15$ ). Jedoch ergeben sich bei dieser Messgeometrie ebenfalls die größten Schwankungen, insbesondere für große Farbschichtdicken (Schwankungsbreite liegt bei  $L^*_{130 \mu\text{m}} - L^*_{180 \mu\text{m}} \approx 20$ ). Wie aus den Abbildung 5-6 a) und b) hervorgeht, lässt sich für die Messgeometrie  $45^\circ/-20^\circ$  ( $as25$ ) in

Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke nahezu keine Veränderung im Helligkeitswert  $L^*$  wahrnehmen.

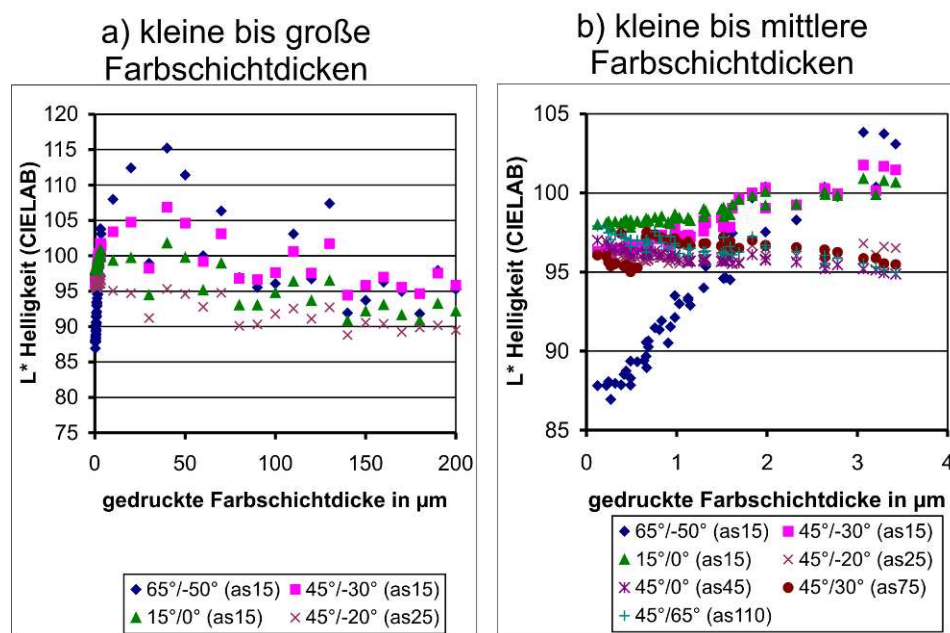


Abbildung 5-6: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien nahe des Glanzwinkels (Messgeometrien mit  $as \pm 15$ ) am Beispiel LithoRed.

Für Messgeometrien mit einer Beobachtung  $as \geq 45^\circ$  (siehe Abbildung 5-7 a) und b)) zeigt der Helligkeitswerte  $L^*$  abnehmende Werte mit größer werdender Farbschichtdicke. Diese Abnahme des Helligkeitswertes  $L^*$  läuft dabei für sehr große Farbschichtdicken ( $s > 150 \mu\text{m}$ ) in einen Helligkeitsgrenzwert  $L^*_{\text{grenz}}$ . Die Größe des Helligkeitsgrenzwertes ist abhängig von der betrachteten Messgeometrie.

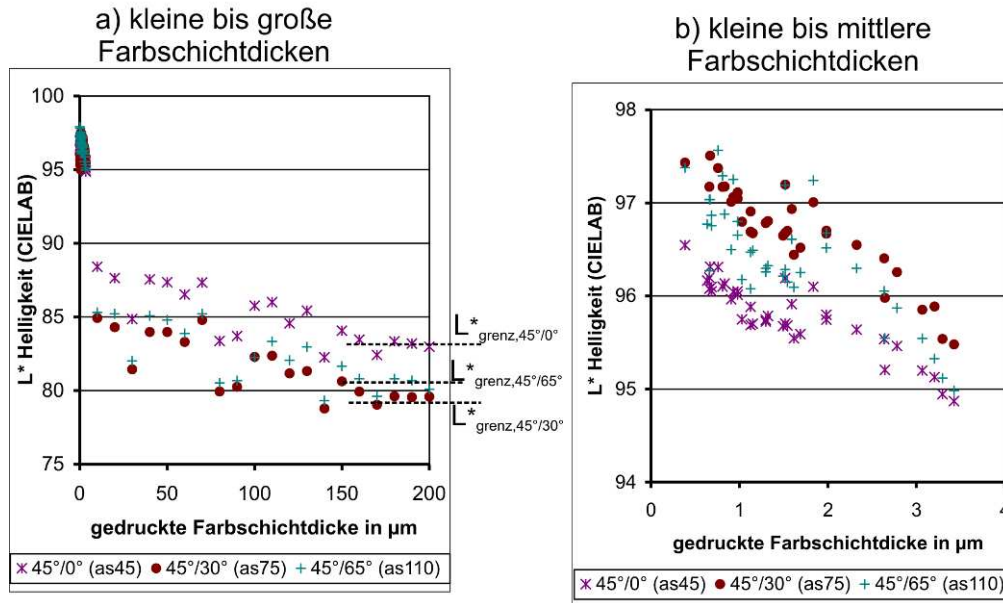


Abbildung 5-7: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien weit weg vom Glanz ( $45^\circ/0^\circ$  (as45),  $45^\circ/30^\circ$  (as75) und  $45^\circ/65^\circ$  (as110)) am Beispiel LithoRed..

Um umfassendere Aussagen für das Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben ableiten zu können, wurde die Interferenz- und Aspektlinie der auf weitere Bedruckstoffe (gestrichenes Kunstdruckpapier, Naturpapier und Zeitungspapier) gedruckten Interferenzeffektfarben LithoRed und LithoBlue ermittelt. In Abbildung 5-8 werden die Ergebnisse am Beispiel von LithoBlue gezeigt. Die Ergebnisse der Interferenzeffektfarbe LithoRed sind im Anhang A1 aufgeführt.

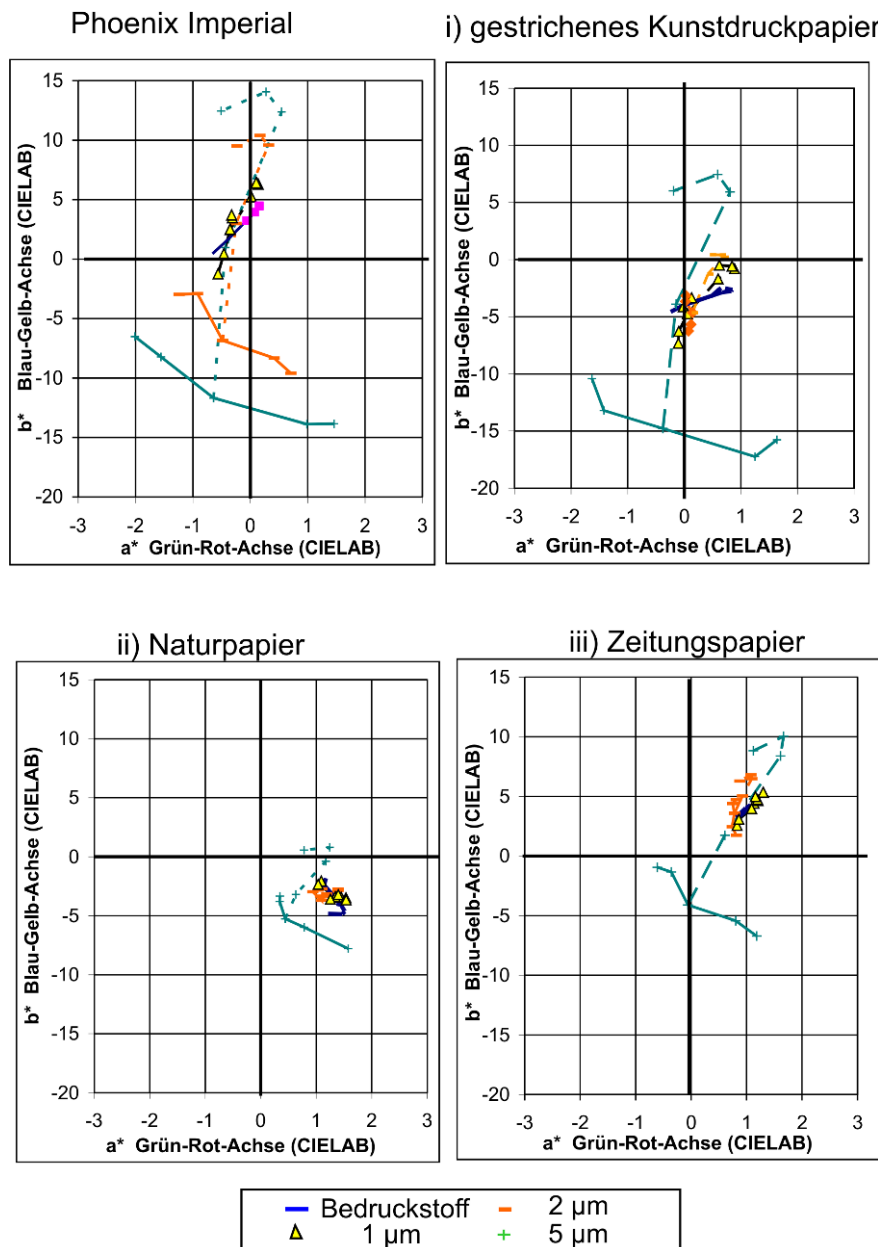


Abbildung 5-8: Verhalten der gedruckten Interferenzeffektfarbe LithoBlue auf unterschiedlichen Bedruckstoffen im Vergleich zum Bedruckstoff Phoenix Imperial: i) gestrichenes Kunstdruckpapier, ii) Naturpapier und iii) Zeitungspapier

Für das gestrichene Kunstdruckpapier und das Naturpapier sind sowohl die Interferenzlinie als auch die Aspektlinie des unbedruckten Bedruckstoffs im deutlich bläulichen Bereich des  $a^*/b^*$ -Diagramms zu finden. Dieser ist auf die Wirkung von optischen Aufhellern, welche in fast allen handelsüblichen Papieren zur Erhöhung der Weiße eingesetzt werden, zurückzuführen. Das Zeitungspapier zeigt hingegen im unbedruckten Zustand einen deutlich gelblichen Farbeindruck.

Die Druckproben weisen ein ähnliches Verhalten wie für den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II, auf. Für kleine Farbschichtdicken ( $s \leq 1 \mu\text{m}$ ) wird die Farbwirkung stark durch die Bedruckstofffarbe beeinflusst, was sich durch sehr ähnliche Verläufe der Messwerte des Bedruckstoffes und der gedruckten Farbschicht ausdrückt. Dies zeigt sich insbesondere für die Druckprodukte auf Zeitungsdruckpapier (Abbildung 5-8 iii)). Für eine Farbschichtdicke von  $s \approx 5 \mu\text{m}$  ist im Glanzwinkel deutlich die Interferenzeffektfarbe anhand der Interferenzlinie (durchgezogene Linie) festzustellen.

Über die Betrachtung der erstellten Druckproben unterschiedlicher gedruckter Farbschichtdicke lässt sich somit ein Zusammenhang zwischen Farbschichtdicke und Farbwirkung erkennen. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine Messgeometrie zur Bewertung der Farbwirkung gedruckter Interferenzeffektfarben nicht ausreicht, da sich sowohl der Farbeindruck entlang der Interferenz- als auch der Aspektlinie verändert. Dieses Verhalten ist ferner für unterschiedliche Bedruckstoffe feststellbar. Bei einer Betrachtung der Helligkeit  $L^*$  ergibt sich für die Druckproben auf den Bedruckstoffen gestrichenes Kunstdruckpapier, Naturpapier und Zeitungspapier ein ähnliches Verhalten wie für den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II (siehe Anhang A2).

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Farbwirkung bei dünnen gedruckten Farbschichtdicken ( $s \leq 1 \mu\text{m}$ ) wird vorwiegend durch den Bedruckstoff bestimmt.
- Mit steigender gedruckter Farbschichtdicke nimmt der Einfluss der Interferenzeffektfarbe deutlich zu.
- Bei mittleren und großen Farbschichtdicken ( $1 \mu\text{m} < s < 200 \mu\text{m}$ ) wird ein Farbflop, von der Interferenzfarbe (LithoRed: rötlich/orange, LithoBlue: blau) hin zu einem gelblichen Farbeindruck sichtbar.
- Die Helligkeit  $L^*$  nimmt bei ansteigender Farbschichtdicke für Messgeometrien mit einer Beobachtung entfernt vom Glanz ( $\alpha_s \geq 45$ ) ab.
- Die für den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II ermittelten Erkenntnisse können auf andere Bedruckstoffe übertragen werden.

## 5.2 Beschreibung gedruckter Interferenzeffektfarben (Modell)

Im Folgenden wird ein theoretisches Modell zur Beschreibung der Farbwirkung gedruckter Interferenzeffektfarben erarbeitet. Zielsetzung ist eine rein qualitative Beschreibung der Zusammenhänge. Hierbei wird auf Angaben der Firma Merck

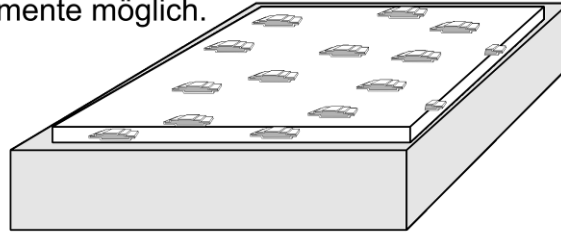
[MER07a] zu typischen Pigmentgrößen, Beschichtungsdicken des Titandioxids und Pigmentkonzentrationen in konventionellen Druckfarben zurückgegriffen (siehe Anhang A3).

In einem ersten Schritt erfolgt die Betrachtung der Verteilung von Effektpigmenten innerhalb einer gedruckten Farbschicht, aus der ein Modell zur Angabe der Effektpigmentverteilung und der daraus resultierenden Flächendeckung mit Pigmenten abgeleitet wird. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten. Auf Grundlage der Interferenzgleichungen wird zunächst eine Vorschrift zur Berechnung der Interferenzfarbe, welche im Glanzwinkel sichtbar wird, gegeben. Darüber hinaus wird die resultierende Farbwirkung bei einer Überlagerung mehrerer Effektpigmente betrachtet. Im dritten Abschnitt wird ein Modellansatz zur Berücksichtigung des Beobachtungswinkels vorgestellt. Abschließend werden die einzelnen Ansätze zusammengefasst und die mit dem Modell erzielten Ergebnisse im CIELAB-Farbsystem dargestellt.

### 5.2.1 Verteilungsmodell

Grundlage des Modells ist die Überlegung bezüglich der Verteilung der Effektpigmente innerhalb einer gedruckten Farbschicht. Abbildung 5-8 a) zeigt eine schematische Darstellung der Verteilung von Effektpigmenten innerhalb einer dünnen gedruckten Farbschicht. Aufgrund des Gewichtsanteils von max. 35 % Effektpigment in einer Druckfarbe [MER07a] werden bei einer kleinen Farbschichtdicke nur wenige Effektpigmente übertragen. Darüber hinaus können sich in der kleinen Farbschichtdicke ( $s < 1 \mu\text{m}$ ) nur sehr wenige Effektpigmente ( $d_{\text{Pigment}} \approx 0,2 - 0,5 \mu\text{m}$ ) überlagern. Abbildung 5-8 b) zeigt eine große gedruckte Farbschichtdicke. Aufgrund der größeren Farbschichtdicke liegt auf einer gleich großen Fläche eine größere Anzahl an Effektpigmenten vor. Nachdem die Fläche mit Pigmenten bedeckt ist, müssen sich die Pigmente vermehrt überlagern. In beiden Fällen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich alle in der Druckfarbe befindlichen Pigmente planparallel zum Untergrund (Bedruckstoff) ausrichten. Diese Annahme beruht auf Erkenntnissen aus dem Automobilbereich bezüglich Reparaturlacken [PFA07a] und auf Angaben der Firma Merck für den Druckbereich [MER07b]. Im Modell wird dabei auf die Berücksichtigung rauer Bedruckstoffoberflächen, wie sie beispielsweise durch ein Naturpapier gegeben sind, verzichtet.

- a) Kleine gedruckte Farbschichtdicke:  
wenige Pigmente. Aufgrund der  
Farbschichtdicke ist keine Überlagerung  
der Pigmente möglich.



- b) Große gedruckte Farbschichtdicke:  
große Anzahl an Pigmenten und  
Überlagerung der Pigmente

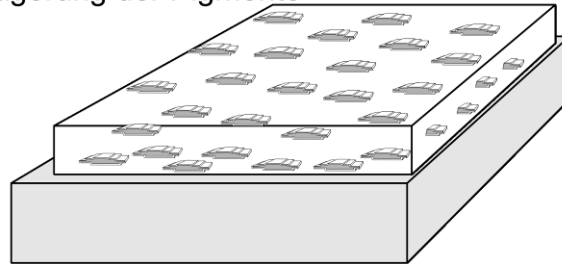


Abbildung 5-9: Gegenüberstellung der Verteilung der Interferenzpigmente in a) einer kleinen und b) einer großen gedruckten Farbschicht

In Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke wird eine bestimmte Menge Druckfarbe auf den Bedruckstoff übertragen. Die Anzahl der Pigmente  $p_{\text{Druckfarbe}}$ , die mit der Druckfarbschicht  $s$  übertragen wird, lässt sich aus dem Masse der übertragenen Druckfarbe  $m_{\text{Druckfarbe}}$ , dem Gewichtsanteil der Pigmente (Gew.-%) in der Druckfarbe und dem Gewicht eines Effektpigments  $m_{\text{pigment}}$  nach Gl. (5.1) bestimmen.

$$p_{\text{Druckfarbe}} = \frac{\text{Massenanteil des Effektpigments an der übertragenen Farbschicht}}{\text{Masse eines Effektpigments}} \quad (5.1)$$

$$p_{\text{Druckfarbe}} = \frac{m_{\text{Druckfarbe}} \cdot \text{Gew.-%}}{m_{\text{Pigment}}}$$

Da in Literaturangaben, z. B. [PFA07a] und [MAI91], sowie den Angaben der verwendeten Druckfarben die Masse eines Pigmentes  $m_{\text{Pigment}}$  nicht aufgeführt ist, muss diese zunächst aus den in der Literatur angegebenen Größen der Dichte der Pigmente  $\rho_{\text{Pigment}}$  einer mittleren Teilchenlänge ( $l_{\text{Pigment}}$ ) und einer mittleren Teilchendicke ( $d_{\text{Pigment}}$ ) berechnet werden (Gl. (5.2)). Vereinfachend wird hierbei für das Effektpigment ein quadratischer Querschnitt ( $A_{\text{Pigment}} = l_{\text{Pigment}}^2$ ) angenommen.

$$m_{\text{Pigment}} = \rho_{\text{Pigment}} \cdot V_{\text{Pigment}} = \rho_{\text{Pigment}} \cdot A_{\text{Pigment}} \cdot d_{\text{Pigment}} \quad (5.2)$$

$$m_{\text{Pigment}} = \rho_{\text{Pigment}} \cdot l_{\text{Pigment}}^2 \cdot d_{\text{Pigment}}$$



In einem nächsten Schritt ist aus der Anzahl der übertragenen Effektpigmente die Bedeckung der bedruckten Fläche und die maximale Überlagerung der Pigmente zu berechnen. Für die Berechnung der maximal möglichen Anzahl an Pigmenten die auf der Druckfläche platziert werden können, wird nochmals die mittlere Teilchengröße herangezogen (Gl. (5.3)). Dabei entspricht die Größe der Druckfläche der im Experiment bedruckten Fläche.

$$p_{\max} = \frac{A_{\text{Druckfläche}}}{A_{\text{Pigment}}} = \frac{A_{\text{Druckfläche}}}{l_{\text{Pigment}}^2} \quad (5.3)$$

Mit Kenntnis beider Größen kann die Flächendeckung  $F$  nach Gl. (5.4) angegeben werden.

$$F = \frac{\text{Anzahl übertragener Pigmente}}{\text{Anzahl maximal möglicher Pigmente auf der Druckfläche}} = \frac{p_{\text{Druckfarbe}}}{p_{\max}} \quad (5.4)$$

Anhand der Flächendeckung und der Berechnung der maximal möglichen Überlagerung der Pigmente  $\ddot{u}_{\max}$  in der gedruckten Farbschichtdicke  $s$  (Gl. (5.5)) wird auf eine statistische Verteilung der Pigmente in der Farbschicht, in Anlehnung an eine Gaußsche Normalverteilung [BLE04], geschlossen (Tabelle 5-1).

$$\ddot{u}_{\max} = \frac{\text{gedruckte Farbschichtdicke}}{\text{Dicke eines Pigments}} = \frac{s}{d_{\text{Pigment}}} \quad (5.5)$$

Wie Erfahrungen aus der Lack- und Kunststoffindustrie zeigen, neigen Pigmente dazu sich (wenn möglich) nicht übereinander, sondern nebeneinander auszurichten [PFA07a]. Die statistische Verteilung der Pigmentüberlagerung basiert auf der ermittelten Flächendeckung  $F$ . Die Zahl vor dem Komma wird dabei als wahrscheinlichste Ebene einer Pigmentüberlagerung angesehen. Dies soll am Beispiel einer übertragenen Farbmenge  $m_{\text{Druckfarbe}} = 0,013 \text{ g}$  (Farbschichtdicke  $s = 3 \mu\text{m}$ ) erläutert werden: Aus der Berechnung der Flächendeckung ergibt sich nach Gl. (5.4)  $F = 1,01$ . Die Fläche ist somit mindestens einmal voll durch die Effektpigmente bedeckt ( $\ddot{u}_{\min} = 1$ ). Darüber hinaus sind weitere Effektpigmente in der Druckfarbe enthalten, die sich auf weiteren Ebenen anordnen. Für die statistische Verteilung wird die voll bedeckte Ebene mit der höchsten Wahrscheinlichkeit belegt ( $\ddot{u}_{\text{wahrscheinl.}}$ ), in diesem Fall mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% ( $\ddot{u}_{\text{wahrscheinl.}} = \ddot{u}_1 = 80\%$ ). Das heißt, dass sich 80% aller in der Druckfarbe befindlichen Effektpigmente in dieser ersten Ebene, also ohne Überlagerung, anordnen. Die ihr am nächsten stehenden Ebene, in diesem Fall, die Überlagerung von 2 Pigmenten, erhält die nächsthöhere Wahrscheinlichkeit bezüglich ihres Auftretens. Bis hin zu der maximalen Überlagerung  $\ddot{u}_{\max}$ , welche mit nur einer geringen

Wahrscheinlichkeit eintreffen und somit mit 1% Wahrscheinlichkeit ( $\ddot{u}_8 = 1\%$ ) angenommen wird. Dies bedeutet, dass sich 1% aller in der Druckfarbe befindlichen Effektpigmente zu einem Stapel von 8 Pigmenten anhäufen.

*Tabelle 5-1: Aus theoretischen Überlegungen ermittelte statistische Verteilung der Effektpigmentüberlagerungen mit:  $m_{\text{Pigment}}$  und  $s$  resultierend aus der experimentellen Probenherstellung,  $A_{\text{Druckfläche}} = (20 \cdot 200) \text{ mm}^2$  (Druckfläche des Versuchs), Gewichtsanteil 35 Gew.-% [MER07b],  $\rho_{\text{Pigment}} = 3 \text{ g/cm}^3$  [PFA07a],  $d_{\text{Pigment}} = 375 \text{ nm}$  (mittlerer Teilchendurchmesser zwischen 200 nm und 500 nm [MER07b]),  $l_{\text{Pigment}} = 15 \mu\text{m}$  (mittlere Teilchengröße zwischen 5  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$  für den Offsetdruck [MER07b])*

m <sub>Druckfarbe</sub> [g]	s [ $\mu\text{m}$ ]	F	$\ddot{u}_{\min}$	$\ddot{u}_{\text{wahr-}}$ scheint.	$\ddot{u}_{\max}$	Wahrscheinlichkeit der Pigmentüberlagerung												
						$\ddot{u}_1$	$\ddot{u}_2$	$\ddot{u}_3$	$\ddot{u}_4$	$\ddot{u}_5$	$\ddot{u}_6$	$\ddot{u}_7$	$\ddot{u}_8$	$\ddot{u}_9$	$\ddot{u}_{10}$	$\ddot{u}_{11}$	$\ddot{u}_{12}$	$\ddot{u}_{13}$
0,002	0,5	0,16	1	1	1	<b>100%</b>												
0,003	1	0,23	1	1	2	<b>95%</b>	5%											
0,005	1,5	0,39	1	1	3	<b>90%</b>	8%	2%										
0,008	2	0,62	1	1	4	<b>90%</b>	5%	3%	2%									
0,01	2,5	0,78	1	1	6	<b>85%</b>	5%	4%	3%	2%	1%							
0,013	3	1,01	2	1	8	<b>80%</b>	5%	4%	3%	3%	2%	2%	1%					
0,016	4	1,24	2	1	10	<b>70%</b>	10%	5%	4%	3%	2%	2%	2%	1%	1%			
0,02	5	1,56	2	1	13	<b>55%</b>	20%	8%	4%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
0,05	10	3,89	4	3	26	10%	15%	<b>25%</b>	15%	10%	5%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%
0,1	120	7,8	8	7	266	1%	2%	3%	5%	10%	15%	<b>25%</b>	15%	10%	5%	2%	1%	1%

Die hier aufgeführte statistische Verteilung beruht auf theoretischen Überlegungen und konnte bisher nicht durch experimentelle Untersuchungen der gedruckten Farbschichten in Dickenrichtung gestützt werden. Da es sich zum einen um sehr dünne Farbschichten und zum Anderen in Bezug auf die Pigmente um nahezu transparente Stoffe handelt, ist die Untersuchung der Farbschicht beispielsweise durch einen Mikrotomschnitt als sehr schwierig anzusehen. Eine zukünftige Verbesserung des Modells sollte jedoch hierauf und auf weitere Möglichkeiten zur Untersuchung der Farbschicht in Dickenrichtung zurückgreifen.

Aus der Wahrscheinlichkeit der Pigmentüberlagerungen lässt sich im Weiteren die Flächendeckung  $F_{\ddot{u},w}$  (Gleichung (5.6)) der überlagerten Effektpigmente auf der gedruckten Fläche ermitteln, siehe Tabelle 5-2.

$$F_{\ddot{u},n} = \ddot{u}_w \cdot \frac{p_{\text{Druckfarbe}}}{p_{\max}} \quad \text{mit: } w = 1, 2, 3, \dots (\text{Anzahl der Pigmentüberlagerungen}) \quad (5.6)$$

Darüber hinaus ergibt sich nach Gleichung (5.7) die Größe der unbedeckten Druckfläche  $F_{\text{unbedeckt}}$ .

$$F_{\text{unbedeckt}} = 1 - \sum_1^w F_{\ddot{u},w} \quad \text{mit: } w = 1, 2, 3, \dots (\text{Anzahl der Pigmentüberlagerungen}) \quad (5.7)$$

*Tabelle 5-2: Aus der statistischen Verteilung resultierende Flächendeckung  $F_{ü,w}$  der Pigmentüberlagerungen und die unbedeckte Fläche  $F_{unbedeckt}$  für unterschiedliche Farbschichtdicken*

m <sub>Druckfarbe</sub>	s [µm]	Flächendeckung pro Pigmentüberlagerung													F <sub>unbedeckt</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
0,002	0,5	0,156													0,844
0,003	1	0,210	0,006												0,784
0,005	1,5	0,311	0,016	0,003											0,671
0,008	2	0,498	0,016	0,006	0,003										0,477
0,01	2,5	0,583	0,019	0,010	0,006	0,003	0,001								0,377
0,013	3	0,607	0,025	0,013	0,008	0,006	0,003	0,003	0,001						0,333
0,016	4	0,622	0,062	0,021	0,012	0,007	0,004	0,004	0,003	0,001	0,001				0,261
0,02	5	0,622	0,156	0,041	0,016	0,009	0,005	0,004	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,137
0,05	10	0,194	0,292	0,324	0,097	0,039	0,019	0,011	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,000
0,1	120	0,078	0,039	0,078	0,097	0,156	0,194	0,278	0,146	0,130	0,078	0,004	0,003	0,003	0,000

Das Verteilungsmodell ermöglicht für die folgende Berechnung der Farbwirkung eine Berücksichtigung von Pigmentüberlagerungen, die zu dem Effekt der Mehrfachinterferenz beitragen. Im zusammenfassenden Modell wird darüber hinaus die Flächendeckung  $F_{ü,w}$  der einzelnen Pigmentüberlagerungen und der unbedruckten Fläche  $F_{unbedeckt}$  zur Berechnung der Gesamtfarbwirkung herangezogen.

### 5.2.2 Farbwirkung von Interferenzeffektpigmenten im Glanzwinkel

Nachdem es mittels der statistischen Verteilung gelungen ist, die Anzahl, die Flächendeckung und die Pigmentüberlagerung der Effektpigmente in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke abzuschätzen, muss im nächsten Schritt die Berechnung der Farbwirkung der Pigmente und der Pigmentüberlagerungen erfolgen. Als Ausgangsbasis hierfür dient die Berechnung der Farbwirkung eines in Firnis (Anwendungsmedium) eingebetteten Pigments, wie in Abbildung 5-10 gezeigt. Der Firnis (Anwendungsmedium) und der Glimmer (als Trägermaterial der Titandioxidschicht) werden als vollkommen transparent angenommen.

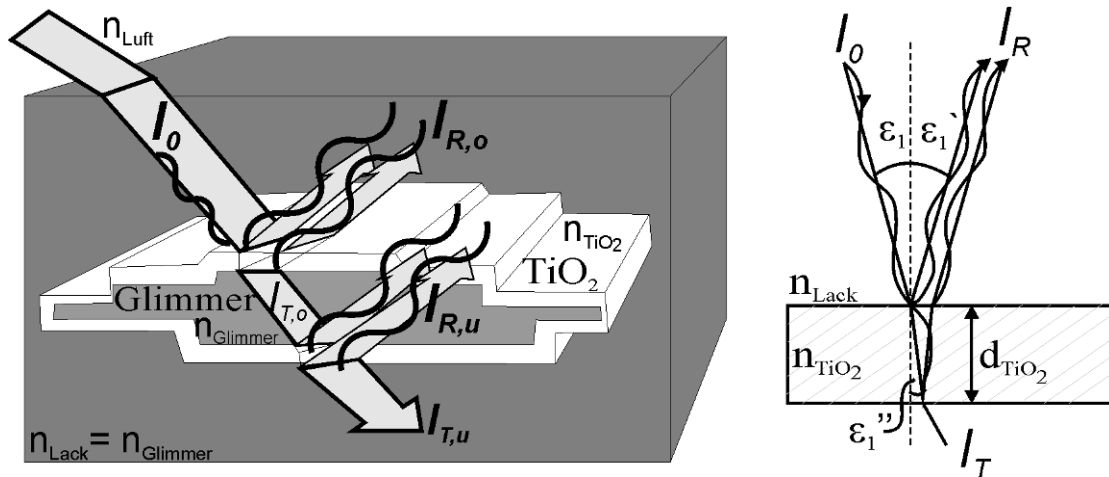


Abbildung 5-10: Vereinfachte Betrachtung eines Interferenzeffektpigments in einem Firnis (Lackschicht)

Zur physikalischen Beschreibung der Vorgänge wurde die aus der Literatur, z. B. [DEM04] und [BER04], bekannte Airy-Formel zur Berechnung der Vielstrahlinterferenz angewendet. Die Airy-Formel ermöglicht die Angabe der Bestrahlungsstärke des reflektierten  $I_R(\lambda)$  und des durchgelassenen (transmittierten)  $I_T(\lambda)$  Strahls in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels  $\varepsilon$  und der Wellenlänge  $\lambda$ , gemäß Gl. (5.8) und Gl. (5.9).

$$\text{Reflexion: } I_R(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \frac{4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)}{(1-R)^2 + 4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)} \quad (5.8)$$

$$\text{Transmission: } I_T(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \frac{1}{(1-R)^2 + 4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)} \quad (5.9)$$

Hierin bezeichnet  $\Delta\varphi$  die Phasendifferenz (Gl. (5.11)) und  $R$  das Reflexionsvermögen, welches sich aus den Brechungseigenschaften der unterschiedlichen Stoffe errechnet (Gl. (5.10))

$$\text{Reflexionsvermögen: } R = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\sin(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} \right)^2 + \left( \frac{\tan(\varepsilon_1 - \varepsilon_1'')}{\tan(\varepsilon_1 + \varepsilon_1'')} \right)^2 \right) \quad (5.10)$$

Die Phasendifferenz ergibt sich in Abhängigkeit des Wegunterschieds, siehe Gl. (5.12), der abhängig von der Beschichtungsstärke des Glimmers mit Titandioxid  $d_{\text{TiO}_2}$  ist und maßgeblich die Farbwirkung des Effektpigments bestimmt.

$$\text{Phasendifferenz: } \Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta s}{\lambda} + \delta\varphi \quad (5.11)$$

$$\text{Wegunterschied: } \Delta s = 2d_{\text{TiO}_2} \sqrt{n_{\text{TiO}_2}^2 - n_{\text{Lack}}^2 \cdot \sin^2 \varepsilon_1} \quad (5.12)$$

Der zur Berechnung der Phasendifferenz angegebene Phasensprung  $\delta\varphi$  ergibt sich aus den Eigenschaften des elektrischen Feldvektors. Für die senkrechte Komponente ( $E_{\perp}$ ) gilt:

- Bei Reflexion am optisch dichteren Medium ist  $\delta\varphi = \pi$
- Bei Reflexion am optisch dünneren Medium ist  $\delta\varphi = 0$

Für die parallele Komponente ( $E_{\parallel}$ ) gilt:

- Bei Reflexion am optisch dichteren Medium ist  $\delta\varphi = 0$  für Einstrahlwinkel  $\varepsilon_1 < \alpha_B$ , aber  $\delta\varphi = \pi$  für  $\varepsilon_1 > \alpha_B$
- Bei Reflexion am optisch dünneren Medium ist  $\delta\varphi = \pi$  für Einstrahlwinkel  $\varepsilon_1 < \alpha_B$ , aber  $\delta\varphi = 0$  für  $\alpha_B < \alpha < \alpha_c$ , wobei  $\alpha_c$  der Grenzwinkel der Totalreflexion ist.

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im Folgenden auf die Kennzeichnung der Wellenlängenabhängigkeit der Intensität verzichtet. Aus allen folgenden Berechnungsschritten folgt jeweils eine Intensitätsverteilung  $I(\lambda)$  über der Wellenlänge.

Da jedes Interferenzeffektpigment aus einer oberen und einer unteren Beschichtung des Glimmers mit Titandioxid besteht, findet an beiden Übergängen Lack-TiO<sub>2</sub>-Glimmer und Glimmer-TiO<sub>2</sub>-Lack eine Überlagerung durch Interferenz statt. Die Airy-Formel muss somit für ein Pigment, unter Berücksichtigung der an der ersten stattfindenden Interferenz, zweimal angewendet werden. Es ergeben sich hieraus  $I_{R,o}$  und  $I_{R,u}$  sowie  $I_{T,u}$  als Intensität der Gesamttransmission (Abbildung 5-10). Aufgrund der Gültigkeit der additiven Mischung von Interferenzeffekten, wie sie in der Literatur [PFA07a] beschrieben ist, ergibt sich für ein Pigment somit in der Reflexion die Intensität zu (Gl.(5.13))

$$I_{R,ges} = I_{R,o} + I_{R,u} \quad (5.13)$$

Für die Berechnung von Pigmentüberlagerungen wird vereinfachend von dem gleichen Prinzip ausgegangen (Abbildung 5-11). Die transmittierte Intensität der ersten Grenzschicht wird für die Berechnung der reflektierten und transmittierten Intensität der folgenden Grenzschicht als neues  $I_0$  zur Berechnung der Airy-Formel herangezogen. Am Ende eines Pigmentpaketes aus mehreren überlagerten Effektpigmenten ergibt sich die transmittierte Intensität  $I_{T,ges}$  direkt aus der transmittierten Intensität der letzten Grenzschicht. In dem in Abbildung 5-11 aufgeführten Beispiel ergibt sich  $I_{T,ges} = I_{T,u3}$ . Die reflektierte Gesamtintensität wird aus der Addition der an den einzelnen Grenzschichten aufgetretenen Intensitäten errechnet. Am in Abbildung 5-11 gezeigten Beispiel errechnet sich die Gesamtintensität zu:

$$I_{R,ges} = I_{R,o1} + I_{R,u1} + I_{R,o2} + I_{R,u2} + I_{R,o3} + I_{R,u3} \quad (5.14)$$

Verluste und Verstärkungen der Effekte durch Mehrfachreflexionen an den Pigmenten bleiben im Modell unberücksichtigt.

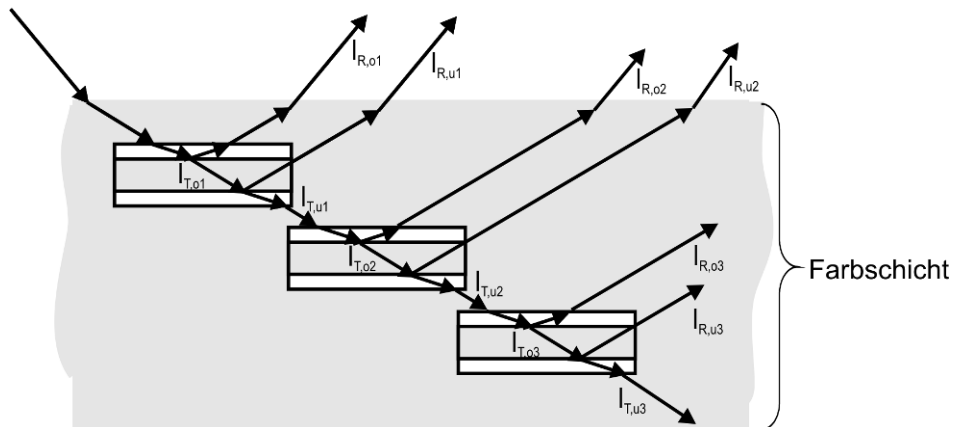


Abbildung 5-11: Prinzip zur Errechnung der Intensitäten in Reflexions- ( $I_R$ ) und Transmissionsrichtung ( $I_T$ ) für überlagerte Effektpigmente

In Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke, der Flächendeckung der Pigmente und der Beobachtungsrichtung trägt der Bedruckstoff aufgrund der Transparenz der Interferenzpigmente entscheidend zur Farbwirkung bei. Für das Modell wird der Bedruckstoff vereinfachend als Lambert-Reflektor angenommen. Eigenschaft eines Lambert-Reflektors ist die Abstrahlung gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Bei einem ebenen Bedruckstoff ergibt sich die Abstrahlung im gesamten Halbraum (Halbkugel) oberhalb der Bedruckstoffoberfläche, also um den Raumwinkel von  $2\pi$ .

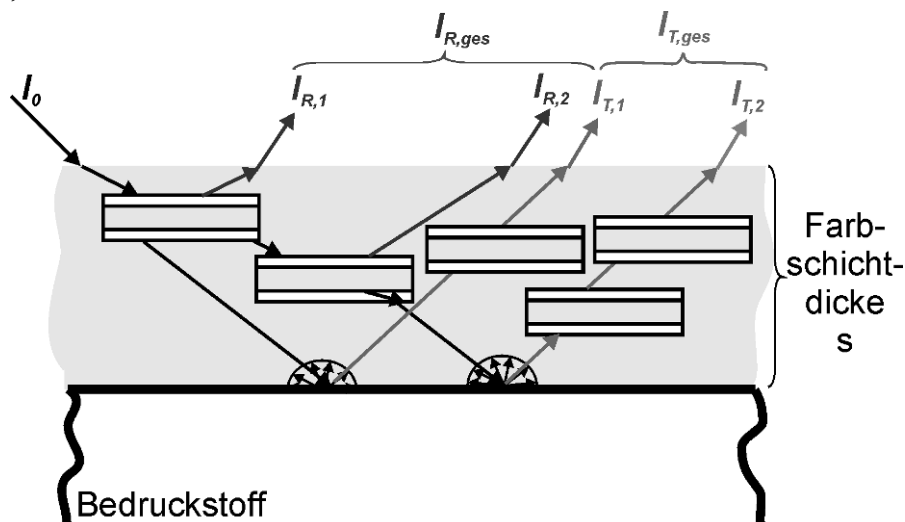


Abbildung 5-12: Vereinfachte Betrachtung der Überlagerung mehrerer Interferenzpigmente in einer gedruckten Farbschicht. Der Bedruckstoff wird in dem dargestellten Fall als Lambert-Reflektor angenommen, d. h. von ihm erfolgt eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Raumrichtungen (Halbkugel).

Es erfolgt die Annahme, dass nach der Reflexion am Bedruckstoff ebensoviele Pigmente passiert werden, wie auf der Strecke zum Bedruckstoff. Hieraus resultiert ein Transmissionsterm (Gleichung (5.15)), der in der additiven Farbmischung ebenfalls zur Gesamtfarbwirkung beiträgt.

$$I_{T,w} = I_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{(1-R)^2 + 4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)} \right)^{4 \cdot w} \quad (5.15)$$

mit:  $w = 1, 2, 3, \dots$  Anzahl der Pigmentüberlagerungen

Da im Verteilungsmodell davon ausgegangen wird, dass an einigen Stellen der Druckfläche keine Pigmente vorliegen können, also hier der Bedruckstoff als unbedeckt zu bezeichnen ist, muss zusätzlich die vom Bedruckstoff ausgehende Bestrahlungsstärke berücksichtigt werden. Analog zu der im Rahmen des Transmissionsbeitrags gewählten Vorgehensweise, wird der Bedruckstoff als Lambert-Reflektor interpretiert. Die gerichtet eingestrahlte Strahlungsenergie wird somit auf den gesamten Halbraum oberhalb der Bedruckstofffläche aufgeteilt. Erfolgt nun eine gerichtete Betrachtung, d. h. die Betrachtung eines infinitesimal kleinen Ausschnitts der Halbkugel, folgt die Berechnung des vom unbedeckten Bedruckstoffs ausgehenden Anteils nach Gleichung (5.16), mit  $R_{\text{Bedruckstoff}} = 1$  für einen Lambert-Reflektor.

$$I_{\text{Bedruckstoff}} = \frac{I_0 \cdot R_{\text{Bedruckstoff}}}{2\pi} \quad (5.16)$$

Bei einer Betrachtung in Glanzrichtung ( $\varepsilon_l = \varepsilon'$ ) ergibt sich hieraus eine Berechnung nach Gl. (5.17).

$$I_{\text{ges}} = I_{R,\text{ges}} + I_{T,\text{ges}} + I_{\text{Bedruckstoff}} \quad (5.17)$$

### 5.2.3 Farbwirkung in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels

Als letzten Effekt, der durch das Modell erfasst werden soll, ist der Einfluss der Beobachtungsrichtung zu nennen. Der durch die Airy-Formel gegebene Zusammenhang für die reflektierte Intensität  $I_R$  zeigt ausschließlich eine Abhängigkeit der Interferenzfarbe vom Einstrahlwinkel auf. Der Einfluss der Beobachtungsrichtung bleibt hierbei unberücksichtigt. In der Literatur sind bezüglich dieses Effektes für Interferenzeffekte derzeit lediglich experimentelle Ergebnisse, jedoch keine theoretischen Modelle vorhanden. Daher wurde der Modellgedanke zur Beschreibung dieses Effektes aus der Computergrafik entliehen. Das Phong-Modell [PHO75] ist eigentlich ein Beleuchtungsmodell und soll die Effekte einer gemischten Reflexion, also einer diffusen und zugleich spiegelnden Reflexion, beschreiben. „Es ist mathematisch sehr einfach.

Allerdings ist es nicht physikalisch basiert, weil es nicht den Energieerhaltungssatz einhält, das heißt, es kann zum Beispiel mehr Licht von einem Objekt ausgesendet werden, als auf es eingestrahlt wird“ [FOL94].

Phong geht davon aus, dass die Abstrahlintensität auf der Achse der ideal spiegelenden Reflexion ( $\varepsilon_1 = \varepsilon'$ ) am höchsten ist und abnimmt, je weiter sich die Beobachtungsrichtung von dieser Achse entfernt. Diese Entfernung wird über den Differenzwinkel  $\gamma$  beschrieben (Abbildung 5-13).

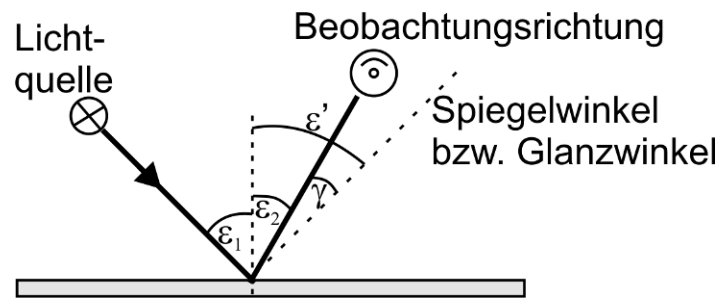


Abbildung 5-13: Winkelbezeichnungen des Phong-Modells [PHO75]

Das Phong-Modell zur Beschreibung einer gemischten Reflexion ergibt sich aus Gl. (5.18). Er sieht hierin eine materialabhängige Konstante  $\alpha$  vor, mit der die Spiegelungseigenschaften des Materials beschrieben werden. Für einen perfekten Reflektor (idealen Spiegel) geht der Wert für  $\alpha$  gegen Unendlich ( $\alpha \rightarrow \infty$ ). Für einen Lambert-Reflektor (ideal matt) ergibt sich  $\alpha = 1$ .

$$I_{\text{Beobachtungswinkel}} = I_0 \cdot \rho \cdot \cos^\alpha(\gamma) \quad (5.18)$$

Für das Modell wird  $\alpha$  so festgelegt, dass in einen Beobachtungswinkel von  $30^\circ$  noch eine erhöhte Reflexion festzustellen ist, diese jedoch deutlich kleiner als die eines Lambert-Reflektors ist (Abbildung 5-14). Die Wahl für den Beobachtungswinkel resultiert dabei aus Literaturangaben bezüglich der Wahrnehmungsgrenze von Interferenzeffekten auf weißem Untergrund, siehe [BÄU73a], [PFA07a]. Für den materialabhängigen Parameter  $\alpha$  ergibt sich hieraus die Festlegung auf  $\alpha = 20$  (Abbildung 5-14 b)).



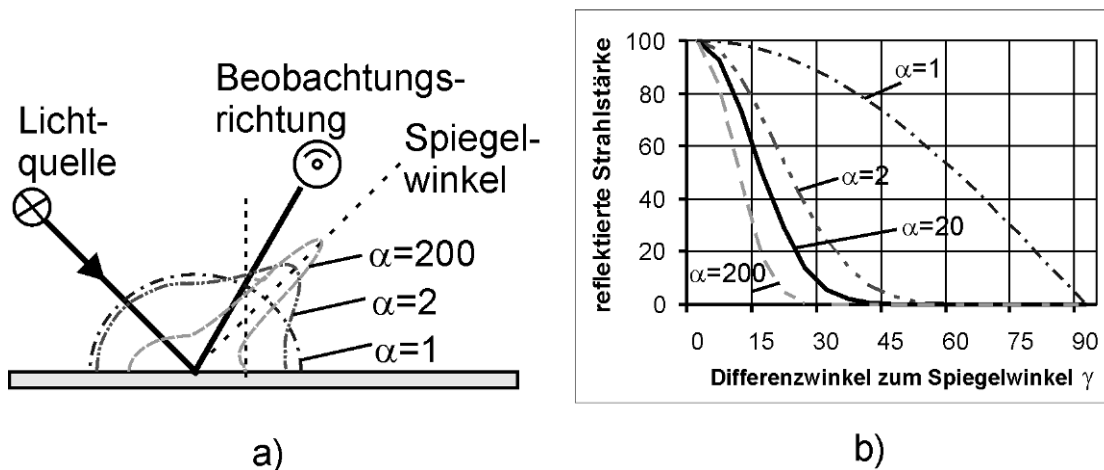


Abbildung 5-14: a) Leuchtdichteverteilung und b) reflektierte Strahlstärke in Abhängigkeit der materialabhängigen Konstanten  $\alpha$  ( $\alpha = 1$ : Lambert-Reflektor,  $\alpha \rightarrow \infty$ : idealer Spiegel)

Im Modell wird der in (5.18) angegebene Zusammenhang zwischen Differenzwinkel  $\gamma$  und reflektierter Intensität  $I_{\text{Beobachtungswinkel}}$  zur Berechnung des Anteils der reflektierten Interferenzfarbe  $I_{R,ges}$  in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels herangezogen. Die Reflexion des Bedruckstoffes und der transmittierte Anteil bleiben unverändert, da von gleichmäßigen Abstrahlung in alle Raumrichtungen (Eigenschaft eines Lambert-Reflektors) ausgegangen wird. Unter Berücksichtigung der dargestellten Zusammenhänge ergibt sich die Berechnung der Gesamtintensität nach Gl. (5.19).

$$I_{ges} = I_{R,ges} \cdot \cos^\alpha(\gamma) + I_T + I_{\text{Bedruckstoff}} \quad (5.19)$$

## 5.2.4 Gesamtmodell und Darstellung der Ergebnisse

Das Gesamtmodell berücksichtigt über die Gleichung (5.19) hinaus das in Abschnitt 5.2.1 dargestellte Verteilungsmodell und die hieraus hervorgegangenen Flächendeckungen  $F_{\ddot{u},w}$  der freien Druckfläche und der einzelnen Pigmentüberlagerungen. Dies soll am Beispiel der Farbschichtdicke  $s = 2 \mu\text{m}$  ( $m_{\text{Druckfarbe}} = 0,008 \text{ g}$ ) verdeutlicht werden. Aus dem Verteilungsmodell ergeben sich die zu berücksichtigenden Pigmentüberlagerungen. Im Falle der Farbschichtdicke  $s = 2 \mu\text{m}$  folgen vier Pigmentüberlagerungen ( $\ddot{u}_{max} = 4$ ), siehe Tabelle 5-1. In der Berechnung der vom Pigment reflektierten Intensität  $I_{R,ges}$  wird ferner die Flächendeckung  $F_{\ddot{u},w}$  (Tabelle 5-2) berücksichtigt. Für das angegebene Beispiel ergibt sich:

$$\begin{aligned}
I_{R,ges} = & F_{\ddot{u},1} \cdot (I_{R,o1} + I_{R,u1}) + F_{\ddot{u},2} \cdot (I_{R,o1} + I_{R,u1} + I_{R,o2} + I_{R,u2}) \\
& + F_{\ddot{u},3} \cdot (I_{R,o1} + I_{R,u1} + I_{R,o2} + I_{R,u2} + I_{R,o3} + I_{R,u3}) \\
& + F_{\ddot{u},4} \cdot (I_{R,o1} + I_{R,u1} + I_{R,o2} + I_{R,u2} + I_{R,o3} + I_{R,u3} + I_{R,o4} + I_{R,u4})
\end{aligned} \quad (5.20)$$

Für den transmittierten Intensitätsanteil  $I_T$  wird das gleiche Verteilungsmodell und die daraus resultierenden Flächendeckungen  $F_{\ddot{u},w}$  wie im Falle des Reflexionsanteil herangezogen. D. h. in der Transmission liegt ebenfalls hauptsächlich ein Effektpigment ( $\ddot{u}_l = 90\%$ ) vor und die maximale Pigmentüberlagerung  $\ddot{u}_{max}$  wird ebenfalls mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% angenommen. Die Berechnung der Intensität  $I_T$ , die sich für das aufgezeigte Beispiel ergibt, ist in Gleichung (5.21) dargestellt.

$$I_T = F_{\ddot{u},1} \cdot I_{T,1} + F_{\ddot{u},2} \cdot I_{T,2} + F_{\ddot{u},3} \cdot I_{T,3} + F_{\ddot{u},4} \cdot I_{T,4} \quad (5.21)$$

Für den Bedruckstoff wird die Flächendeckung der unbedeckten Fläche  $F_{unbedeckt}$  (Tabelle 5-2) zur Berechnung herangezogen. Hieraus ergibt sich:

$$I_{Bedruck} = F_{unbedeckt} \cdot \frac{\Phi_0 \cdot \rho_{Bedruckstoff}}{2\pi} \quad \text{mit } \rho_{Bedruckstoff} = 1 \quad (5.22)$$

Wie bereits oben erwähnt, sind die einzelnen Anteile von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängig. Somit ergibt sich in der Zusammenfassung der einzelnen Anteile entsprechend Gleichung (5.19) ebenfalls eine wellenlängenabhängige Gesamtintensitätsverteilung  $I_{ges}(\lambda)$ . Diese wird im Folgenden entsprechend einer Remissionskurve  $\beta(\lambda)$  eingesetzt:

$$I_{ges}(\lambda) \equiv \beta_{Modell}(\lambda) \quad (5.23)$$

Durch diese Festlegung ist es möglich, die Gesetzmäßigkeiten der Farbmatrik, wie sie in Kapitel 2.4.2 erläutert wurden, zur Berechnung der Farbwirkung im CIELAB-Farbsystem (Gleichung 2.17) anzuwenden. Im Gegensatz zur experimentellen Analyse lassen sich keine Unterschiede zwischen der cis- (as+ $\gamma$ ) und der trans-Stellung (as- $\gamma$ ) durch das Modell nachstellen, da das Phong-Modell nur eine Aussage bezüglich eines allgemeinen Differenzwinkels  $\gamma$  zulässt.

Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zeigen für zwei berechnete Interferenzfarben (Interferenz-Rot:  $d_{TiO_2} = 90 \text{ nm}$  und Interferenz-Blau:  $d_{TiO_2} = 130 \text{ nm}$ ) die mittels des Modells errechnete Farbwirkung unterschiedlich großer Farbschichten. Es zeigt sich qualitativ ein sehr ähnliches Verhalten, wie es schon bei den Ergebnissen der experimentellen Analyse festgestellt werden konnte. Für kleine Farbschichtdicken ( $s \leq 1 \mu\text{m}$ ) zeigt sich für alle Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel eine Farbwirkung nahe dem Unbuntpunkt. Mit größer werdender Farbschichtdicke nimmt der Einfluss der

Interferenzeffektfarbe (im aufgeführten Beispiel a) Rot und b) Blau) in den Messgeometrien nahe des Glanzwinkels zu. Darüber hinaus wird bei dem angenommenen mattweißen Untergrund (Lambert-Reflektor) mit zunehmender Farbschichtdicke in den Beobachtungsrichtungen mit einem großen Differenzwinkel zum Glanz der Einfluss der Gegenfarbe deutlich größer.

Bei einer Betrachtung der Helligkeit  $L^*$  (Abbildung 5-16) lässt sich ebenfalls ein qualitativ ähnliches Verhalten wie bei den experimentellen Ergebnissen feststellen. Auch hier ergibt sich aus dem Modell für die Messgeometrien mit einem Beobachter nahe des Glanzes (as15) eine zunehmende Helligkeit mit ansteigender Farbschichtdicke. Außerdem kann für Messgeometrien mit einem Beobachter weit weg vom Glanz (as45, as75 und as110) eine abnehmende und für die Messgeometrie  $45^\circ/-20^\circ$  (as25) eine nahezu konstant bleibende Helligkeit mit zunehmender Farbschichtdicke festgestellt werden.

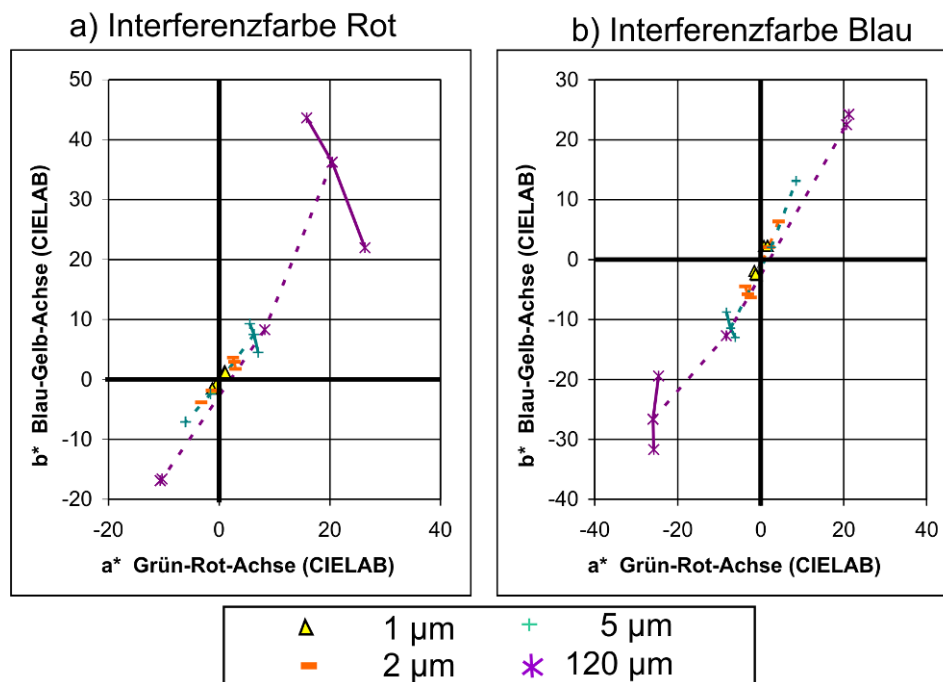


Abbildung 5-15: Mittels des Modells errechnete Farbwirkung gedruckter Interferenzfarben unterschiedlicher Farbschichtdicke a) Interferenzfarbe Rot  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$ ; b) Interferenzfarbe Blau  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$

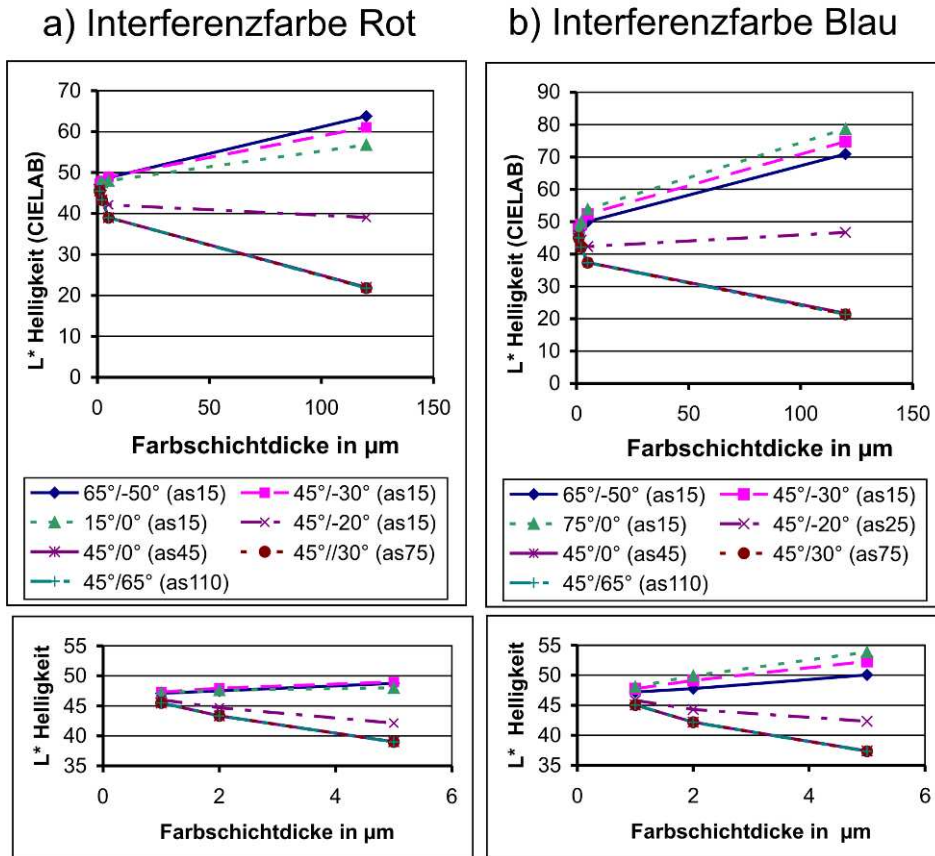


Abbildung 5-16: Mittels des Modells errechnete Helligkeit  $L^*$  gedruckter Interferenzfarben unterschiedlicher Farbschichtdicke a) Interferenzfarbe Rot  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$ ; b) Interferenzfarbe Blau  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$

Abschließend soll anhand der in Abbildung 5-17 dargestellten Gegenüberstellung der Messergebnisse der auf Phoenix Imperial APCO II/II gedruckten Interferenzeffektfarben LithoBlue mit dem vom Modell errechneten Verlauf für ein Interferenzblau ( $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$ ), auf die Grenzen des Modells eingegangen werden.

Es zeigt sich, dass durch das Modell qualitativ die Veränderung mit größer werdender Farbschichtdicke erfasst werden kann. Dennoch ist es mit dem Modell nicht möglich, das exakte Verhalten nachzustellen (Abbildung 5-17).

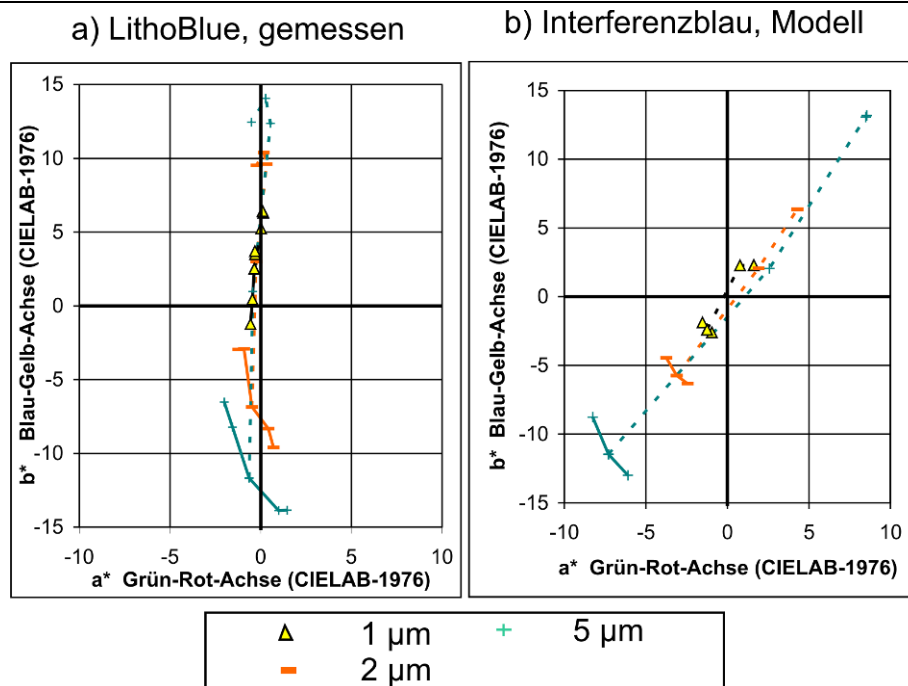


Abbildung 5-17: Gegenüberstellung der Messergebnisse der auf Phoenix Imperial gedruckten Interferenzeffektfarbe LithoBlue und dem aus dem Modell errechneten Verhalten für ein Interferenzblau ( $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$ )

Dies ist auf mehrere Vereinfachungen, die im Rahmen des Modells getroffen wurden, zurückzuführen. Zum Ersten ist hier der als Lambert-Reflektor angenommene Bedruckstoff zu nennen. Im Gegensatz zu den messtechnisch ermittelten, für die verschiedenen Bedruckstoffe deutlich unterschiedlichen Verläufe hinsichtlich der Messgeometrien, ergibt sich in dem Modell ein einzelner Messpunkt im Unbuntpunkt, siehe Abbildung 5-18. In Bezug auf die Farbwirkung der gedruckten Interferenzeffektfarbe zeigt die Veränderung der Farbwirkung des Bedruckstoffs jedoch großen Einfluss. In einem erweiterten Folgemodell müsste daher die Veränderung der Farbwirkung durch eine gesonderte Betrachtung ergänzt werden, um mithilfe des Modells gezielte Aussagen bezüglich der Farbwirkung machen zu können.

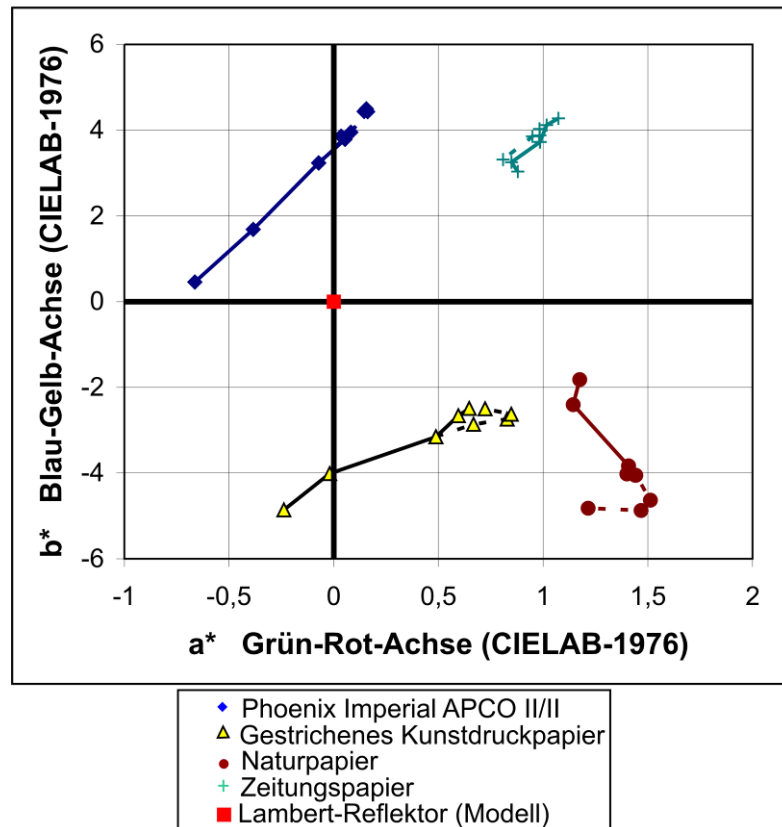


Abbildung 5-18: Gegenüberstellung der Messergebnisse (FX10) unterschiedlicher Bedruckstoffe (Phoenix Imperial, gestrichenes Kunstdruckpapier, Naturpapier, Zeitungspapier) und dem Lambert-Reflektor (Modell)

Eine weitere Einschränkung des Modells, ist die Erfassung der Interferenzeffektfarbe durch eine festgelegte Beschichtungsdicke der Glimmerpigmente durch Titandioxid ( $d_{TiO_2}$ ). Aus Fachgesprächen [DfwG2007] konnte in Erfahrung gebracht werden, dass käuflich zu erwerbende Interferenzeffektfarben immer aus Pigmenten unterschiedlicher Beschichtungsdicke ( $d_{TiO_2}$ ) bestehen, um eine gleichbleibende Farbwirkung und Qualität zu garantieren. Dieser Aspekt unterschiedlicher Pigmente wurde bisher im Modell noch nicht berücksichtigt. In Absprache mit dem Pigmenthersteller bzw. aus weitergehenden experimentellen Untersuchungen könnte dieser Aspekt jedoch in das Modell integriert werden. Wird nochmals die in Abbildung 5-17 dargestellte Gegenüberstellung betrachtet, kann dieser Umstand deutlich zur Drehung des aus dem Modell resultierenden Verlaufs in den grünlichen Bereich ( $-a^*$ - und  $-b^*$ -Farbwerte) gegenüber dem messtechnisch ermittelten Verlauf führen, rein bläuliche Farbwirkung (nur  $-b^*$ -Farbwerte).

Bezüglich des Abstandes zwischen den im Modell und dem Experiment ermittelten Verläufe ist auf das Phong-Modell und den hierin enthaltenen Faktor  $\alpha$  einzugehen. Dieser Parameter wurde im Modell durch eine theoretische

Annahme angegeben. Auch hier können weitere experimentelle Untersuchungen dazu herangezogen werden, den gewählten Faktor präziser zu definieren und hierdurch eine Verbesserung der Approximation der experimentellen Ergebnisse durch das Modell zu bewirken.

### 5.3 Geeignete Messgeometrien für die Qualitätskontrolle

Anhand der Ergebnisse der experimentellen Analyse und unter Zuhilfenahme des Modells werden in diesem Kapitel die zur Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzfarben notwendigen Messgeometrien erarbeitet. Zu diesem Zweck wird der sich ergebende Farbunterschied zwischen den Messgeometrien anhand des Farbabstands  $\Delta E_{ab}^*$  betrachtet.

Da für den Farbabstand  $\Delta E_{ab}^*$  immer ein Soll- mit einem Ist-Wert verglichen wird, erfolgt die Bildung des Farbabstandes für ausgewählte Messgeometrien als Soll-Wert. Gegen die jeweiligen Soll-Werte werden die übrigen Messgeometrien als Ist-Werte behandelt und die daraus resultierenden Farbabstände miteinander verglichen. Aufseiten der Aspektlinie<sup>34</sup> wird die 45°/0° (as45)-Messgeometrie als Soll-Wert gewählt, da sie in der heutigen Praxis eine entscheidende Rolle bezüglich der Farbmessung spielt. Entlang der Interferenzlinie<sup>35</sup> werden zwei unterschiedliche Messgeometrien (65°/-50° und 45°/-30°) als Soll-Werte eingesetzt. Die Wahl dieser zwei Messgeometrien erfolgt aufgrund ihrer Lage entlang der Interferenzlinie (65°/-50°: markiert meist den äußeren Eckpunkt; 45°/-30°: entspricht meist dem Mittelpunkt der Interferenzlinie). Darüber hinaus sind alle ausgewählten Messgeometrien durch das Modell berechenbar.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt am Beispiel dreier ausgewählter Farbschichtdicken: 1 µm, 2 µm und 5 µm. Ihre Ergebnisse repräsentieren den kleinen, mittleren und großen Farbschichtdickenbereich. Aus ihnen lässt sich auf das Verhalten der innerhalb dieser Bandbreite befindlichen Farbschichtdicken schließen.

---

<sup>34</sup> Aspektlinie: Messgeometrie mit einem Beobachter weit entfernt vom Glanzwinkel (45°/-20°(as 25), 45°/0°(as45), 45°/30°(as75) und 45°/65°(as110)).

<sup>35</sup> Interferenzlinie: Messgeometrie mit einem Beobachter nahe des Glanzwinkels (65°/-50°(as15), 45°/-60°(as-15), 45°/-30°(as15), 15°/-30°(as-15) und 15°/0°(as15)).

### 5.3.1 45°/0° (as45)-Messgeometrie als Referenz

In einem ersten Schritt wird das Verhalten der gedruckten Farbschicht (Interferenzeffektfarbe) in Abhängigkeit der Messgeometrie zu der heute in der Druckindustrie üblichen 45°/0° (as45)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert) betrachtet. Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse der Druckfarben LithoRed (a) und LithoBlue (b) sowie die aus dem Modell für ein Interferenz-Rot mit  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$  (c) und Interferenz-Blau mit  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$  (d) resultierenden Farbabweichung  $\Delta E^*_{ab}$  zu den jeweiligen Farbwerten der 45°/0° (as45)-Messgeometrie.

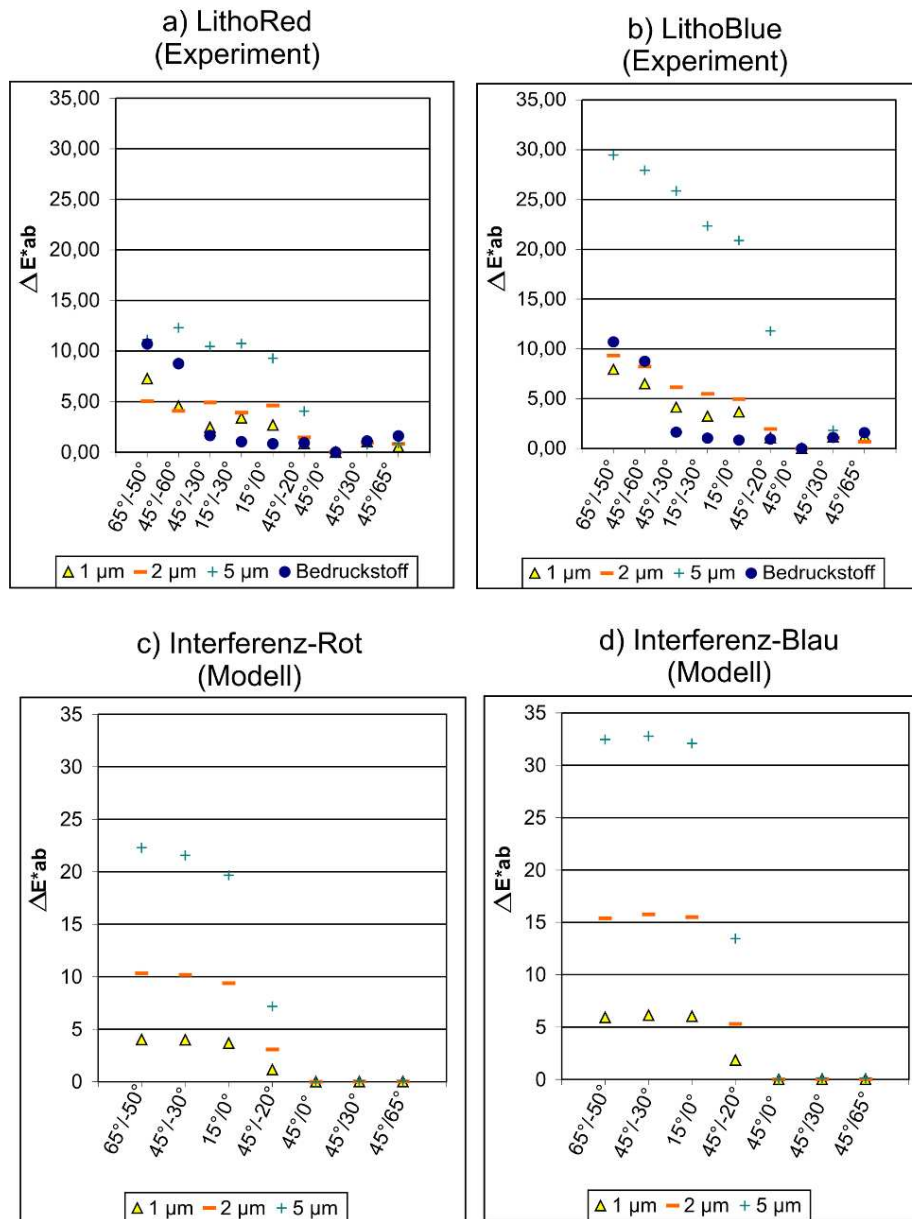


Abbildung 5-19: Farbabweichung  $\Delta E^*_{ab}$  in Abhängigkeit der Messgeometrie zur 45°/0° (as45)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert). a) LithoRed, b) LithoBlue, c) Interferenz-Rot mit  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$  und d) Interferenz-Blau mit  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$



Wie sowohl an den aus dem Modell berechneten als auch den experimentell ermittelten Ergebnissen zu sehen ist, ergibt sich für Messgeometrien der Interferenzlinie (as15 und as-15) ein großer Farbabstand zu den Referenzwerten der 45°/0° (as45)-Messgeometrie. Besonders ist dabei zu bemerken, dass der Bedruckstoff selbst für die Messgeometrien 65°/-50° (as15) und 45°/-30° (as-15) einen deutlichen Farbabstand ( $\Delta E^*_{ab,65^\circ/-50^\circ} = 11$  bzw.  $\Delta E^*_{ab,45^\circ/-30^\circ} = 8,7$ ) aufweist und dieser sogar größer als der bei kleinen (1  $\mu\text{m}$ ) und mittleren Farbschichtdicken (2  $\mu\text{m}$ ) ist. Es zeigt sich insbesondere an den Messgeometrien der Interferenzlinie (as15 und as-15), dass, wie zu erwarten war, der Farbabstand mit größer werdender Farbschichtdicke deutlich zunimmt.

Hieraus kann geschlossen werden, dass die alleinige Betrachtung der 45°/0° (as45)-Messgeometrie für die qualitative Beurteilung von gedruckten Interferenzeffektfarben nicht ausreichend ist. Für ihre Beurteilung wird die Untersuchung mindestens einer weiteren Messgeometrie notwendig, welche auf der Interferenzlinie liegt und somit mit einer Beobachtungsrichtung nahe des Glanzes ausgestattet ist.

Es stellt sich die Frage, welcher Zusatznutzen aus den Messgeometrien der Aspektlinie gezogen werden kann. Hierzu werden die Messergebnisse der gedruckten Interferenzeffektfarben LithoRed und LithoBlue der Messgeometrien 45°/-20° (as25), 45°/30° (as65) und 45°/60° (as110) nochmals separat betrachtet (Abbildung 5-20).

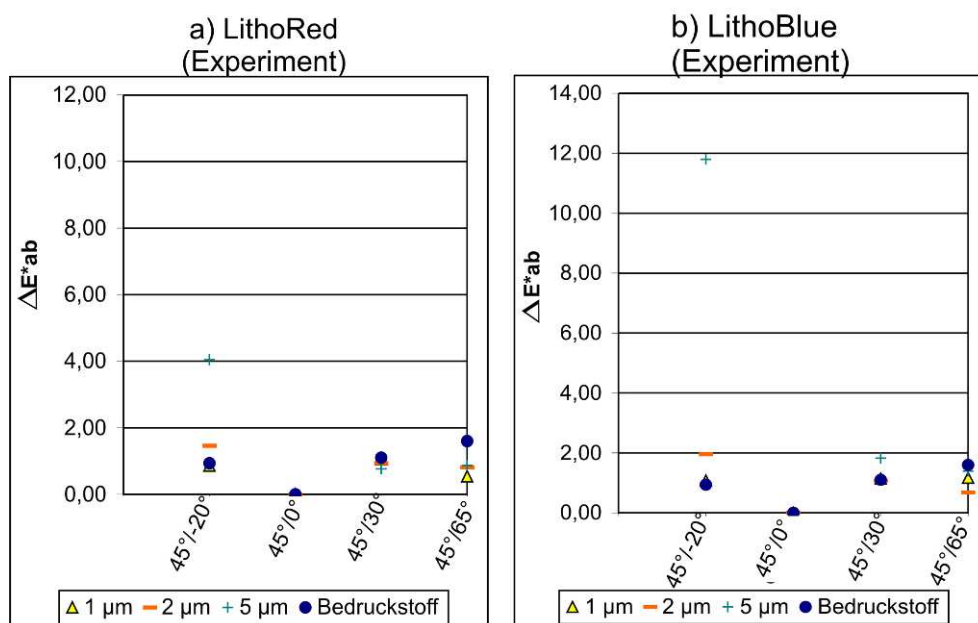


Abbildung 5-20: Farbabstand  $\Delta E^*_{ab}$  der Messgeometrien der Aspektlinie (45°/-20° (as25), 45°/30° (as65) und 45°/60° (as110)) zur Messgeometrie 45°/0° (as45) als Referenz (Soll-Wert). a) LithoRed und b) LithoBlue

Für die Messgeometrie  $45^\circ/-20^\circ$  (as25) ist noch deutlich der Einfluss des Interferenzeffektes, der sich vornehmlich im und nahe des Glanzwinkels zeigt, anhand des deutlich größeren Farbabstands zu identifizieren. Für die beiden weiteren Messgeometrien, deren Beobachtungsposition weit weg vom Glanzwinkel gewählt ist, ergibt sich sowohl für die gedruckte Interferenzeffektfarbe LithoRed, wie auch LithoBlue, ein kleiner Farbabstand von  $\Delta E_{ab}^* < 2$  gegenüber der Messgeometrie  $45^\circ/0^\circ$  (as45). Ein Farbabstand von  $\Delta E_{ab}^* < 2$  gilt als geringfügig wahrnehmbar [BEL04]. Daher wird die Untersuchung dieser zwei zusätzlichen Messgeometrien als nicht notwendig angesehen.

Tabelle 5-3 führt die zuvor grafisch dargestellten Mess- und Berechnungsergebnisse in Bezug auf den Farbabstand der  $45^\circ/0^\circ$  (as45)-Messgeometrie als Messwert zusammengefasst auf. Es wird deutlich, dass die aus dem Modell berechneten Farbwerte in den Messgeometrien nahe des Glanzes (as15 und as-15) für mittlere und große Farbschichtdicken zu größeren Farbabständen führen. In Bezug auf die Aspektlinie ergeben sich hingegen deutlich kleinere Farbabstände als im Experiment.

*Tabelle 5-3: Zusammenfassung der experimentell und aus dem Modell erzielten Ergebnisse für den Farbabstand  $\Delta E_{ab}^*$  referenziert auf die  $45^\circ/0^\circ$  (as45)-Messgeometrie.*

		Bedruckstoff	LithoRed			LithoBlue			Interferenz-Rot berechnet			Interferenz-Blau berechnet		
			1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Referenz $45^\circ/0^\circ$ (as45)	$65^\circ/-50^\circ$ (as15)	10,702	7,27	5,02	11,14	7,94	9,33	29,46	4,01	10,32	22,29	5,92	15,39	32,46
	$45^\circ/-60^\circ$ (as-15)	8,7572	4,55	4,08	12,31	6,49	8,23	27,94						
	$45^\circ/-30^\circ$ (as15)	1,644	2,47	4,91	10,46	4,15	6,15	25,87	3,99	10,18	21,56	6,13	15,77	32,79
	$15^\circ/-30^\circ$ (as-15)	1,0366	3,39	3,90	10,75	3,24	5,47	22,35						
	$15^\circ/0^\circ$ (as15)	0,8362	2,69	4,62	9,29	3,66	4,96	20,89	3,67	9,39	19,67	6,04	15,51	32,09
	$45^\circ/-20^\circ$ (as25)	0,9364	0,86	1,46	4,04	1,07	1,96	11,80	1,15	3,08	7,17	1,84	5,30	13,45
	<b><math>45^\circ/0^\circ</math> (as45)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	$45^\circ/30^\circ$ (as65)	1,1022	1,05	0,93	0,76	1,14	1,06	1,82	0,01	0,02	0,06	0,01	0,04	0,13
	$45^\circ/65^\circ$ (as110)	1,6001	0,54	0,81	0,87	1,17	0,68	1,39	0,01	0,02	0,06	0,01	0,04	0,13

### 5.3.2 Messgeometrien entlang der Interferenzlinie als Referenz

In den weiteren Schritten sollen die Messgeometrien der Interferenzlinie näher betrachtet werden. Da sich im Kapitel 5.3.1 bereits ein großer Farbabstand zur  $45^\circ/0^\circ$  (as45)-Messgeometrie herausgestellt hat, werden im Weiteren ausschließlich die Farbabstände der Messgeometrien der Interferenzlinie ( $65^\circ/-50^\circ$  (as15),  $45^\circ/-60^\circ$  (as-15),  $45^\circ/-30^\circ$  (as15),  $15^\circ/-30^\circ$  (as-15) und  $15^\circ/0^\circ$  (as15)) betrachtet.

Zunächst erfolgt die Referenzierung des Farbabstands auf die  $65^\circ/-50^\circ$  (as15)-Messgeometrie. Diese Referenzierung wird gewählt, da bei der Untersuchung der Messergebnisse die mit ihr ermittelten Messergebnisse in der CIELAB-Farbraumdarstellung meist eine äußere Position einnehmen (siehe CIE- $a^*/b^*$ -Diagramm: äußere Eckpunkte, siehe Abbildung 5-4).

Es zeigt sich insbesondere für den unbedruckten Bedruckstoff ein großer Farbabstand von  $\Delta E_{ab}^* \approx 11$  für die  $15^\circ/0^\circ$  (as15)-Messgeometrie. Die gleiche Größenordnung des Farbabstands des Bedruckstoffs kann darüber hinaus für die Messgeometrien der Aspektlinie festgestellt werden (Abbildung 5-21).

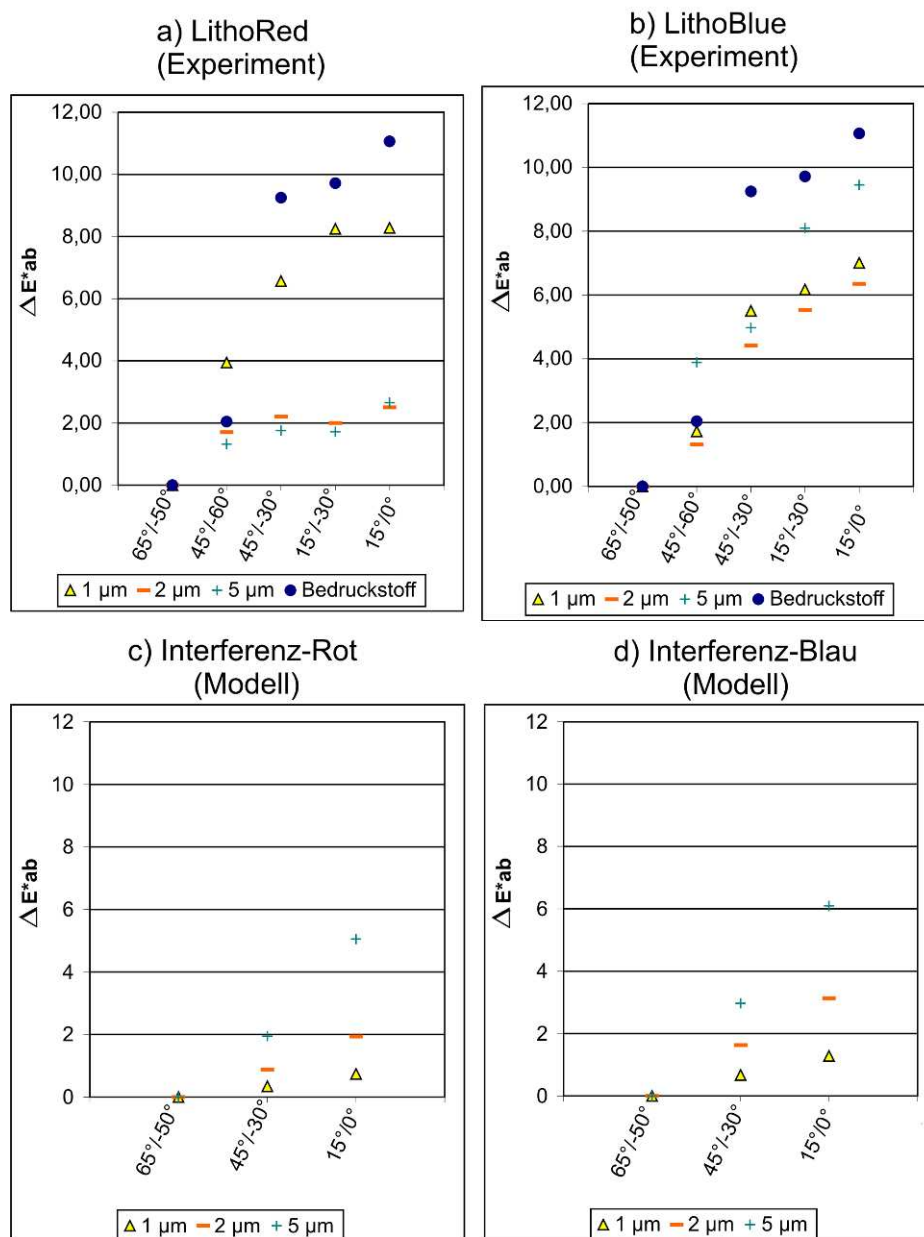


Abbildung 5-21: Farbabstand  $\Delta E_{ab}^*$  in Abhängigkeit der Messgeometrie zur  $65^\circ/-50^\circ$  (as15)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert). a) LithoRed, b) LithoBlue, c) Interferenz-Rot mit  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$  und d) Interferenz-Blau mit  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$

Erklärbar ist dieses Verhalten durch die sehr flache Beleuchtungs- ( $65^\circ$ ) und Beobachtungsrichtung ( $50^\circ$ ) der Referenz-Messgeometrie. Hierdurch kommt es zu einer stärkeren Wahrnehmung der Streueffekte der Bedruckstoffoberfläche [POH63], welche sich der eigentlichen Beobachtung der Farbwirkung überlagern. Hierin ist auch die Begründung der ASTM [ASTM WK 1164], welche diese Messgeometrie als ergänzende, jedoch nicht verbindliche Messgeometrie vorschlägt, zu sehen.

Aufgrund der sehr großen Einflussnahme der Messgeometrien auf die Beobachtung des Bedruckstoffs ergeben sich für kleine gedruckte Farbschichtdicken, hier am Beispiel von  $1\text{ }\mu\text{m}$ , ebenfalls große Farbabstände. Lediglich für die mittlere ( $2\text{ }\mu\text{m}$ ) und die große Farbschichtdicke ( $5\text{ }\mu\text{m}$ ) werden im Experiment und dem Modell ähnlich große Farbabstände in Abhängigkeit der Messgeometrie erzielt. Sie indizieren über alle Farbschichtdicken für LithoRed einen geringen Unterschied ( $\Delta E_{ab}^* < 2$ ) und für LithoBlue einen mittleren bis großen Unterschied ( $\Delta E_{ab}^* < 10$ ).

Als Zweites erfolgt eine Betrachtung des Farbabstands zur  $45^\circ/-30^\circ$  (as15)-Messgeometrie als Referenz. Diese Messgeometrie markiert in den zuvor betrachteten Verläufen im CIE-a\*/b\*-Diagramm den Mittelpunkt der Interferenzlinie.

Wie bereits bei der  $65^\circ/-50^\circ$  (as15)-Messgeometrie erfolgt auch hier eine Betrachtung der gedruckten Interferenzeffektfarben LithoRed, LithoBlue und des aus dem Modell errechneten Interferenz-Rot und Interferenz-Blau (Abbildung 5-22). Es zeigt sich ein insgesamt kleinerer Farbabstand als dies bei der  $65^\circ/-50^\circ$  (as15)-Messgeometrie gegeben war. Auch hier ergeben sich die größten Farbabstände bezüglich der  $65^\circ/-50^\circ$  (as15)- und  $45^\circ/-60^\circ$ -Messgeometrien für den unbedruckten Bedruckstoff. Diese sind auf die erhöhte Wahrnehmung von Streueffekten der Bedruckstoffoberfläche aufgrund der flachen Beleuchtungsrichtung ( $65^\circ$ ) und/oder Beobachtungsrichtung ( $-50^\circ$  bzw.  $-60^\circ$ ) zurückzuführen.

Für die  $15^\circ/-30^\circ$  (as-15) und  $15^\circ/0^\circ$  (as15) ergibt sich nur für die große Farbschichtdicke von  $5\text{ }\mu\text{m}$  ein mittlerer sichtbarer Unterschied, feststellbar an einem Farbabstand  $\Delta E_{ab}^* < 5$  im Falle des gedruckten LithoBlue (Abbildung 5-22 b)). Für die berechneten Interferenzfarben ergeben sich kleinere Farbabstände  $\Delta E_{ab}^* < 4$ , sowohl für Interferenz-Rot als auch Interferenz-Blau. Für kleinere Farbschichtdicken ist in den beiden oben genannten Messgeometrien sowohl für LithoRed als auch LithoBlue ein geringer sichtbarer Unterschied im Vergleich zur  $45^\circ/-30^\circ$  (as15)-Messgeometrie festzustellen ( $\Delta E_{ab}^* < 2$ ). Insgesamt zeigen sich für das berechnete Interferenz-Rot und auch

die gedruckte Interferenzeffektfarbe LithoRed kleinere Farbabstände als für LithoBlue und Interferenz-Blau.

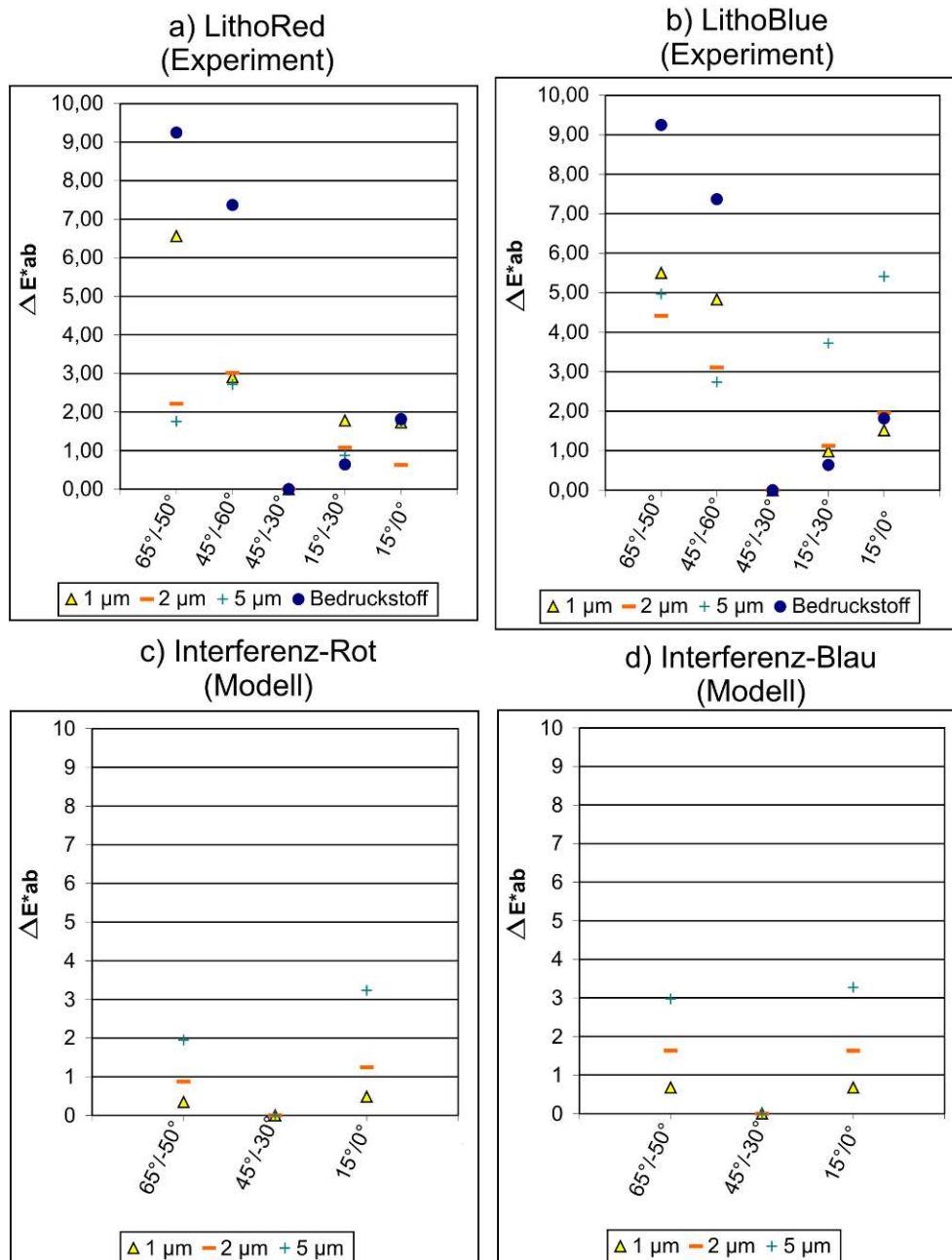


Abbildung 5-22: Farbabstand  $\Delta E^*_{ab}$  in Abhängigkeit der Messgeometrie zur 45°/-30° (as15)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert). a) LithoRed, b) LithoBlue, c) Interferenz-Rot mit  $d_{\text{TiO}_2} = 90 \text{ nm}$  und d) Interferenz-Blau mit  $d_{\text{TiO}_2} = 130 \text{ nm}$

### 5.3.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Es konnte gezeigt werden, dass mindestens zwei Messgeometrien zur ausreichend genauen Erfassung des Farbeffektes von Interferenzeffektfarben notwendig sind. Dies zeigt sich an dem sehr großen wahrnehmbaren Unterschied, der zwischen der  $45^\circ/0^\circ$  (as45) und den Messgeometrien der Interferenzlinie ( $65^\circ/-50^\circ$ ,  $45^\circ/-60^\circ$ ,  $45^\circ/30^\circ$ ,  $15^\circ/-30^\circ$  und  $15^\circ/0^\circ$ ) mit  $\Delta E_{ab}^* > 2,5$  für alle Farbschichtdicken,  $\Delta E_{ab}^* > 5$  für Farbschichtdicken  $s > 2 \mu\text{m}$ , angezeigt wird.

Innerhalb der Gruppe der Messgeometrien mit einem Beobachtungswinkel weit entfernt vom Glanzwinkel ( $45^\circ/0^\circ$ ,  $45^\circ/30^\circ$  und  $45^\circ/65^\circ$ ) ergeben sich lediglich geringe Veränderungen in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels  $\Delta E_{ab}^* < 1,8$ . Aufgrund dessen bringen sie nur einen geringen Zusatznutzen gegenüber der heute in der Druckindustrie üblichen  $45^\circ/0^\circ$ -Messgeometrie und können unberücksichtigt bleiben.

Entlang der Aspektlinie ist die zusätzliche Messgeometrie  $45^\circ/-20^\circ$  (as25) gegeben. Sie weist im Vergleich zu den anderen Messgeometrien der Aspektlinie einen deutlich größeren Farbabstand zur  $45^\circ/0^\circ$ -Messgeometrie auf. Dies ist durch die nähere Lage am Glanzwinkel und damit den noch erheblichen Einfluss des Interferenzeffektes erklärbar. Die Messergebnisse dieser Messgeometrie bilden eine Verbindung zur Interferenzlinie. Sie zeigt immer eine schwächere Farbwirkung als diese an. Diese Messgeometrie kann als zusätzliche Messgeometrie eingesetzt werden, ist jedoch für die Entscheidung bezüglich der Qualität der gedruckten Interferenzeffektfarben nicht essenziell wichtig, da der voll ausgeprägte Farbeffekt bei ihr nicht sichtbar wird.

Aufseiten der Messgeometrien entlang der Interferenzlinie zeigt sich für die Messgeometrien  $65^\circ/-50^\circ$  (as15) und  $45^\circ/-60^\circ$  (as-15) der große Einfluss der Wahrnehmung von Streueffekten des Bedruckstoffs aufgrund der flachen Beleuchtungs- und/oder Beobachtungswinkel deutlich. Dies ist dadurch angezeigt, dass der unbedruckte Bedruckstoff für die beiden oben genannten Messgeometrien die größten Farbabstände aufweisen. Bei einer visuellen Kontrolle konnte jedoch keine signifikante Veränderung der Farbwirkung des unbedruckten Bedruckstoffs festgestellt werden. Daher ist fraglich ob diese beiden Messgeometrien das visuell sichtbare Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben richtig erfassen können. Es ist zunächst notwendig, die Richtigkeit der Messergebnisse dieser beiden Messgeometrien anhand einer standardisierten visuellen Abmusterung zu verifizieren. Da bis heute jedoch

keine Standardisierungen zur visuellen Abmusterung und keine Abmusterungsprüfstände vorliegen, ist dies als Aufgabe für weitere Forschungsarbeiten anzusehen. Erste Prüfstandskonzepte und Abmusterungsversuche hierzu werden derzeit am Fachgebiet für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technischen Universität Darmstadt erarbeitet, müssen sich jedoch in der Realität noch beweisen.

Für die Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben bedeutet die Unsicherheit bezüglich der beiden oben genannten Messgeometrien ( $65^\circ/-50^\circ$  (as15) und  $45^\circ/-60^\circ$  (as-15)), dass sie derzeit als ungeeignet angesehen werden müssen.

Bei der Betrachtung der drei verbleibenden Messgeometrien der Interferenzlinie ( $45^\circ/-30^\circ$  as(15),  $15^\circ/-30^\circ$  (as-15) und  $15^\circ/0^\circ$  (as15)) zeigt sich zwischen den Messgeometrien ein sehr kleiner sichtbarer Unterschied in der Farbwirkung:  $\Delta E_{ab}^* < 2$  für Farbschichtdicken  $s \leq 2 \mu\text{m}$ . Für größer werdende Farbschichtdicken nimmt der sichtbare Unterschied zu ( $\Delta E_{ab}^* \approx 5$  für Farbschichtdicke  $s = 5 \mu\text{m}$ ).

Für den Offsetdruck mit einem drucktypischen Farbschichtdickenbereich zwischen  $0,8 \mu\text{m}$  bis  $2,5 \mu\text{m}$  bedeutet dies, dass über eine der drei Messgeometrien die Farbwirkung der Effektfarbe nahe des Glanzwinkels ausreichend genau beschrieben wird.

Bezüglich der Umsetzung in einem Messgerät für die Druckindustrie, welches zur Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben geeignet ist, wird empfohlen, die Messgeometrie  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) als zusätzliche Messgeometrie neben der heute üblichen Messgeometrie  $45^\circ/0^\circ$  (as45) zu verwenden. Hierdurch ist es auf eine einfache Art und Weise möglich die bestehenden Messgeräte zu erweitern, da lediglich ein zusätzlicher Sensor vorgesehen werden muss. Dies ermöglicht zusätzlich eine schnelle Messung und die Beibehaltung der Größe der Messöffnung. Für das Verfahren zur Qualitätskontrolle wird die Messung der gedruckten Interferenzeffektfarben vornehmlich mit der  $45^\circ/-30^\circ$  (as15)-Messgeometrie vorgeschlagen, da durch sie die Effektfarbe erfasst werden kann. Für konventionelle Absorptionsfarben (Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz) kann die heute übliche Messgeometrie von  $45^\circ/0^\circ$  (as45) beibehalten werden.

Die hier vorgestellte Empfehlung zur Vorgehensweise und Umsetzung wurde bereits in dem Patentantrag [HUP07c] und einem Antrag auf ein Gebrauchsmuster [HUP07d], die im Rahmen dieser Arbeit gestellt wurden, veröffentlicht.

## 5.4 Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Flexodruck

Aufgrund der weit verbreiteten Anwendung des Flexodrucks für gedruckte Interferenzeffektfarben sowie der durch den Flexodruck möglichen größeren Farbschichtdicken und Pigmentgrößen, wird in diesem Kapitel die Anwendbarkeit der für den Offsetdruck erarbeiteten Qualitätskontrolle überprüft. Hierbei wird auf Druckproben und Messungen, die im Rahmen der Studienarbeit von Kammleiter [KAM07] erstellt wurden, zurückgegriffen.

Abbildung 5-23 zeigt einleitend die Interferenzeffektfarben Perlviolett und Perlweiß mit den Rasterwalzen W1 (geringes Schöpfvolumen) und W6 (großes Schöpfvolumen) im CIELAB- $a^*/b^*$ -Diagramm. Im Gegensatz zu einem deutlichen Unterschied in der Farbwirkung in Bezug auf den unbedruckten Bedruckstoff, kann für beide Farben nur eine leichte Veränderung mit Vergrößerung des Schöpfvolumens identifiziert werden. Perlviolett zeigt so für beide Schöpfvolumina gegenüber dem unbedruckten Bedruckstoff für die Interferenzlinie (durchgezogene Linie) eine Verschiebung in Richtung violett (blau-rot), für die Aspektlinie hingegen eine Verschiebung in Richtung gelbgrün. Die Interferenzeffektfarbe Perlweiß weist bei dieser Betrachtung für Messgeometrien nahe des Glanzes (Interferenzlinie) einen leicht grün-bläulichen Charakter auf. Für die Messgeometrien der Aspektlinie, verschiebt sich die Farbwirkung in Richtung gelb.

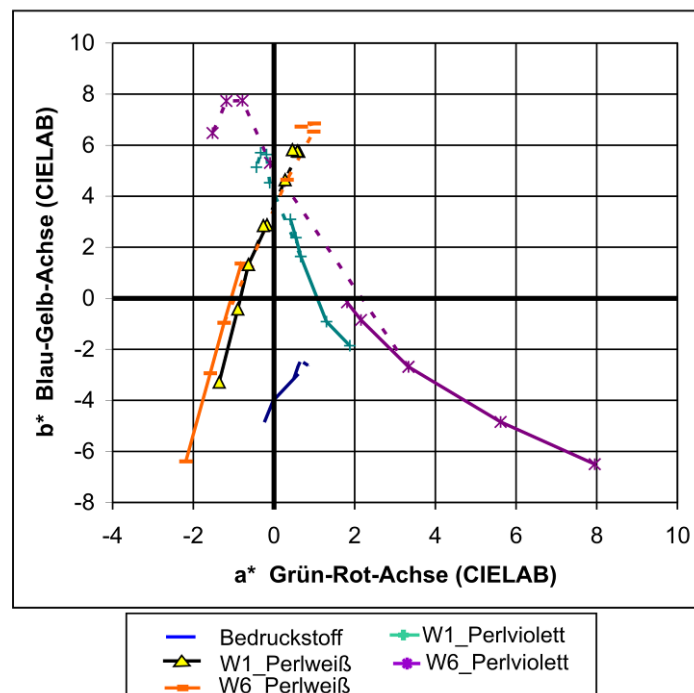


Abbildung 5-23: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Flexodruckversuche für zwei unterschiedliche Rasterwalzen (W1 und W6) für die Druckfarben Perlviolett und Perlweiß



Die Größe der Veränderung bei einer Variation der Schöpfvolumina (Rasterwalze W1 bis W6) gegenüber dem unbedruckten Bedruckstoff ist in Abbildung 5-24 durch den Farbabstand  $\Delta E_{ab}^*$ <sup>36</sup> gegeben.

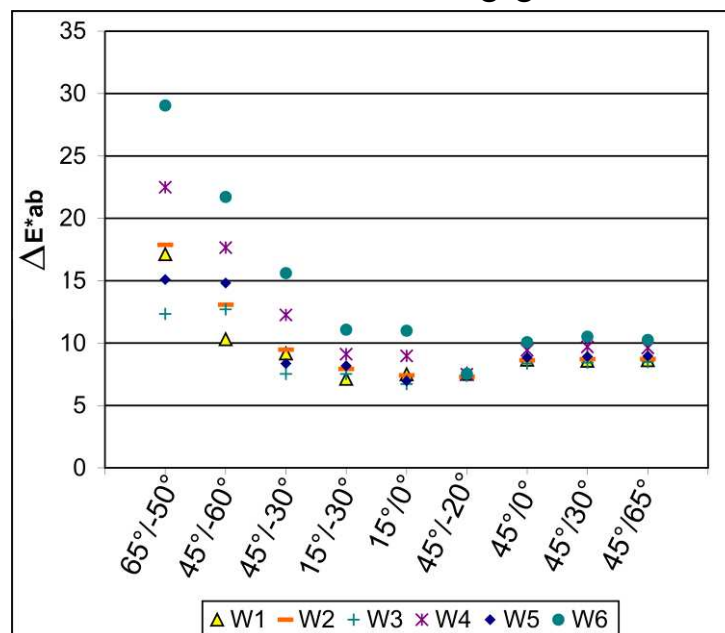


Abbildung 5-24: Farbabstand  $\Delta E_{ab}^*$  in den unterschiedlichen Messgeometrien zu den Farbwerten des Bedruckstoffs als Soll-Werte für die unterschiedlichen Rasterwalzen (Schöpfvolumen  $W1 < W2 < W6$ , W3 und W5 sind gekennzeichnet durch einen größeren Rasterwinkel von  $53^\circ$ )

In Abhängigkeit des Schöpfvolumens und der Rasterfrequenz zeigen sich in Bezug auf den Bedruckstoff in den Messgeometrien unterschiedlich große Farbabstände. Die größten Farbabstände ergeben sich für die Rasterwalze W6 in den Messgeometrien der Interferenzlinie ( $65^\circ/-50^\circ$ ,  $45^\circ/-60^\circ$ ,  $45^\circ/-30^\circ$ ,  $15^\circ/-30^\circ$  und  $15^\circ/0^\circ$ ). Mithilfe der Messgeometrien der Aspektlinie ( $45^\circ/-20^\circ$ ,  $45^\circ/0^\circ$ ,  $45^\circ/30^\circ$  und  $45^\circ/65^\circ$ ) lässt sich der Einfluss der verwendeten Rasterwalze nicht eindeutig identifizieren, da die Farbabstände der einzelnen Druckproben nahe beieinanderliegen.

Um abschätzen zu können, ob auch im Falle des Flexodrucks die zwei Messgeometrien  $45^\circ/0^\circ$  (as45) und  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) ausreichend für die Qualitätskontrolle sind, werden auch hier die Farbabstände zu den beiden genannten Messgeometrien betrachtet (Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26). Es zeigt sich auch hier wieder ein großer Farbabstand (i. a.  $\Delta E_{ab}^* > 5$ ) zwischen der  $45^\circ/0^\circ$  (as45)-Messgeometrie und den Messgeometrien der Interferenzlinie ( $65^\circ/-50^\circ$ ,  $45^\circ/-60^\circ$ ,  $45^\circ/-30^\circ$ ,  $15^\circ/-30^\circ$  und  $15^\circ/0^\circ$ ). Für die Messgeometrien der

<sup>36</sup> Der Farbabstand wird hierbei auf die Farbwerte des unbedruckten Bedruckstoffs referenziert.

Aspektlinie ( $45^\circ/-20^\circ$ ,  $45^\circ/0^\circ$ ,  $45^\circ/30^\circ$  und  $45^\circ/65^\circ$ ) ergibt sich ebenfalls ein kleiner Unterschied zwischen den unterschiedlichen Messgeometrien, der anhand eines Farbabstands  $\Delta E^*_{ab} < 2$  angezeigt wird.

Aufseiten der Messgeometrien auf der Interferenzlinie zeigen sich wiederum für die Messgeometrien  $65^\circ/-50^\circ$  und  $45^\circ/-30^\circ$  die größten Farbabstände. Wie bereits in Kapitel 5.3.3 können sie aufgrund der großen Beeinflussung durch Streueffekte der Bedruckstoffoberfläche nicht weiter berücksichtigt werden. Für die zwei verbleibenden Messgeometrien  $15^\circ/-30^\circ$  und  $15^\circ/0^\circ$  ergeben sich im Vergleich zu den Druckprodukten des Offsetdrucks größere Farbabstände. Für die Interferenzeffektfarbe Perlweiß ergeben sich dabei die größten Farbabstände mit  $\Delta E^*_{ab} < 5$ , die einen mittleren sichtbaren Unterschied zwischen der Farbwirkung angeben. Zurückzuführen ist dies auf die größeren Farbschichtdicken und die im Vergleich zum Offsetdruck verwendeten größeren Pigmente.

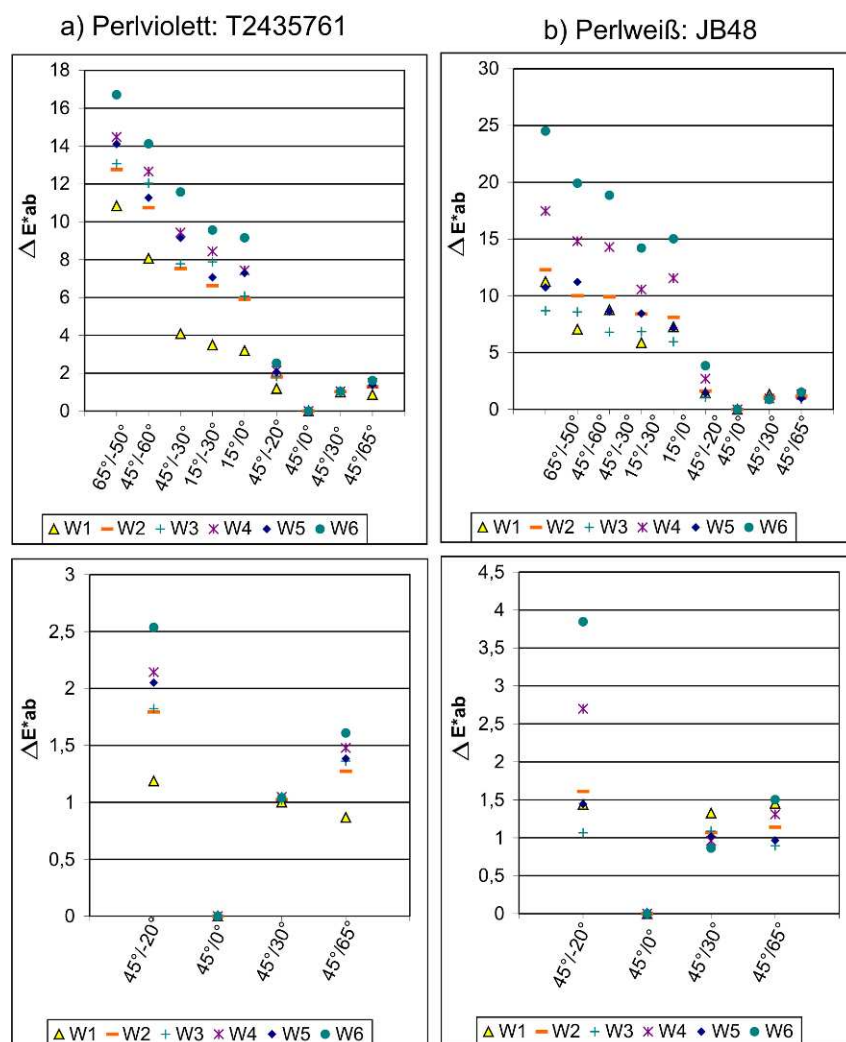


Abbildung 5-25: Farbabstand  $\Delta E^*_{ab}$  in Abhängigkeit der Messgeometrie zur  $45^\circ/0^\circ$  (as45)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert). a) Perlviolett und b) Perlweiß

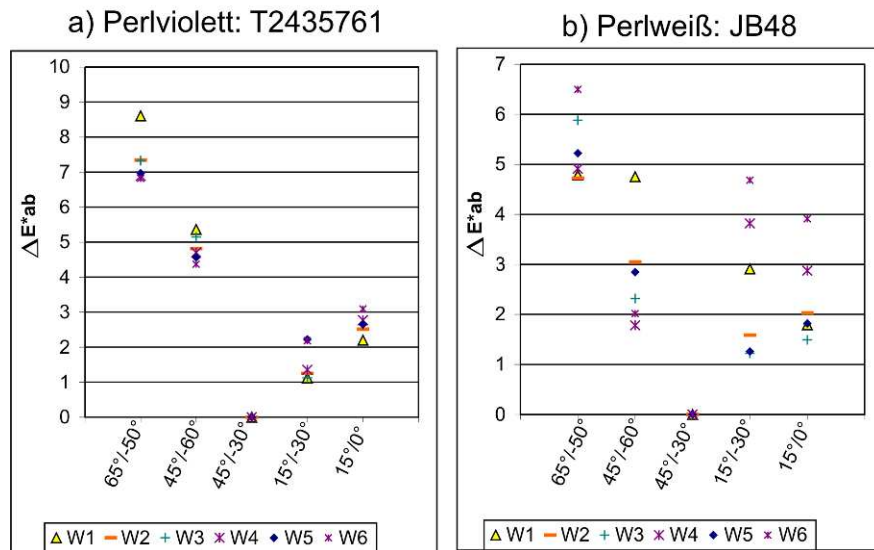


Abbildung 5-26: Farbabstand  $\Delta E^*_{ab}$  in Abhängigkeit der Messgeometrie zur 45°/-30° (as45)-Messgeometrie als Referenz (Soll-Wert). a) Perl violett und b) Perlweiß

Trotz der größeren Farbabstände für die Messgeometrien 15°/-30° und 15°/0° im Vergleich zum Offsetdruck ist davon auszugehen, dass die entscheidende Farbveränderung, welche durch die Interferenzeffektfarbe bewirkt wird, sich mittels der zusätzlichen Messgeometrie 45°/-30° ausreichend genau erfassen lässt.

Schlussfolgernd lässt sich zusammenfassen, dass auch für die im Flexodruck hergestellten Druckproben ein Einfluss der Farbschichtdicke, die in diesem Fall mit der gewählten Rasterwalze einhergehen, festzustellen ist. Ferner hat sich gezeigt, dass unter Tolerierung eines leichten, wahrnehmbaren Unterschieds in den unterschiedlichen Messgeometrien der Interferenzlinie eine Qualitätskontrolle mit den Messgeometrien 45°/-30° (as15) für die Erfassung der Interferenzfarbe und 45°/0° (as45) für die Erfassung der durch die Bedruckstoffremission überlagerten Gegenfarbe ausreichend ist.

## 6 Messgröße zur Prozesskontrolle

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Analyse bezüglich einer geeigneten Messgröße zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben dargestellt. Hierzu wird zunächst die Eignung der heute üblichen Messgrößen (Densitometrie: Dichte  $D_C$ ,  $D_M$  und  $D_Y$ ), die vorwiegend zur Prozesskontrolle eingesetzt werden, bewertet. In diesem Zusammenhang werden sowohl die erstellten Druckproben des Einzelfarbendrucks als auch die des Übereinanderdrucks auf Schwarz berücksichtigt. Der zweite Teil dieses Kapitels befasst sich mit der Entwicklung neuer Messstrategien zur Beurteilung und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben. In einem ersten Modell werden die Möglichkeiten, die durch einen Übereinanderdruck auf der Absorptionsfarbe Schwarz gegeben sind, überprüft. Das zweite Modell leitet aus theoretischen Überlegungen und Ergebnissen der experimentellen Analyse bezüglich farbmetrischer Werte die neue Messgröße ( $L_H$ ) ab. Abschließend erfolgt eine Bewertung der neu entwickelten Messgröße  $L_H$  mittels Druckproben anderer Bedruckstoffe.

### 6.1 Heutige Praxis: Messung der Dichte $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$

Im Einzelfarbendruck kann die Veränderung der Farbwirkung der gedruckten Farbe in Abhängigkeit der Farbschichtdicke direkt, ohne Beeinflussung anderer am Prozess beteiligter Farben, beobachtet werden. Für Absorptionsfarben konnte darüber hinaus durch Tollenaar und Ernst im Jahre 1964 [TOL64] ein direkter Zusammenhang zwischen der Dichte und der Farbschichtdicke abgeleitet werden. Im Folgenden werden die Messergebnisse der Einzelfarbendrucke dahin gehend untersucht, ob sich aus den heute in der Druckindustrie bekannten Messgrößen (Dichte  $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$  und farbmetrische Größen  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ ) ein ähnlicher Zusammenhang für gedruckte Interferenzeffektfarben ableiten lässt.

Den Ausgangspunkt der experimentellen Analyse bezüglich der Prozesskontrolle stellen die Messergebnisse der heute in der Druckindustrie üblichen 45°/0°- bzw. 0°/45°- Messgeometrie dar. Darüber hinaus werden in einem separaten Abschnitt Messergebnisse anderer Messgeometrien betrachtet.

Exemplarisch werden in diesem Kapitel die Auswertungen für die Interferenzeffektfarbe LithoRed dargestellt. Die weiteren Druckfarben LithoBlue und LithoWhite zeigen bezüglich der untersuchten Messgrößen und -verfahren ein vergleichbares Verhalten. Einzelergebnisse dieser Druckfarben sind daher dem Anhang B zu entnehmen.

Die Dichte lässt sich, wie in Kapitel 2.3.3 gezeigt, über sogenannte Filterdensitometer direkt bestimmen oder mittels der in DIN 16536-2 vorgeschriebenen Filterkurven aus der gemessenen Remissionskurve berechnen. Hierbei wurden sowohl die Filterdensitometer als auch die Filterkurven immer auf die Skalenfarben (CMYK) abgestimmt. Dennoch ist eine Prozesskontrolle anhand der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) eingeschränkt auch für Sonderfarben möglich. Vorteilhaft wäre daher die Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben ebenfalls über die Messwerte der Dichte realisieren zu können.

Messungen mit den Filterdensitometern Chamäleon und VipDens C9 zeigen, dass Filterdensitometer zur Erfassung der veränderten Farbschichtdicke gedruckter Interferenzeffektfarben nicht geeignet sind. Bei den Messungen der Druckproben wurde in den überwiegenden Fällen der Hinweis „Genullt“ bzw. die Dichte „0“ ermittelt. Erst bei sehr großen Farbschichtdicken ( $s > 3 \mu\text{m}$ ) konnte zwar eine Dichte erfasst werden, die jedoch nicht einem eindeutigen Filter  $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  oder  $D_K$  zugeordnet werden kann.

Durch das im Leitstandsystem FM19 integrierte Filterdensitometer konnten, im Gegensatz zu den oben genannten Hand-Filterdensitometern, Messwerte für die Dichte gewonnen werden. Es zeigt sich eine stetige, aber geringfügige Dichtezunahme mit steigender Farbschichtdicke im Gelb-Filter  $D_Y$ , siehe Abbildung 6-1. Wie zu sehen ist, liegt bei einer minimalen Farbschichtdicke ( $s \approx 0,5 \mu\text{m}$ ) eine Dichte von  $D_Y \approx 0,14$  vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Messwerte des FM19 auf ein Bezugsweiß (Weißstandard) und nicht, wie bei Filterdensitometern sonst üblich, auf den Bedruckstoff beziehen. Bei einer Farbschichtdicke von  $s \approx 3 \mu\text{m}$ , im angegebenen Beispiel für LithoRed, ergibt sich eine Dichte von  $D_Y \approx 0,19$  und somit eine Veränderung um  $\Delta D_Y \approx 0,05$ . Für den im Offsetdruck relevanten Farbschichtdickenbereich um  $s \approx 1 \mu\text{m}$  fällt die Veränderung nochmals geringer aus und liegt dabei im Bereich der durch den Messgerätehersteller angegebenen Genauigkeit von  $\pm 0,02$ . Insgesamt lassen sich daher die gemessene Dichte und die angezeigte Änderung als wenig aussagekräftig bewerten.

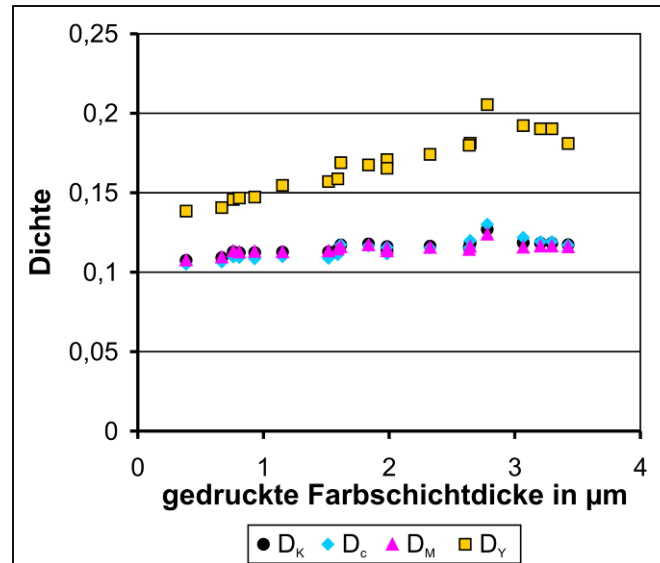


Abbildung 6-1: Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ), gemessen mit dem Filterdensitometer des Leitstandssystems FM19; Druckfarbe: LithoRed.

Neben den Filterdensitometern wurden Farbmessgeräte eingesetzt. Aus den hiermit ermittelten Remissionswerten lassen sich, wie bereits oben bemerkt, Dichtewerte  $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$  berechnen. Auch bei den aus der Berechnung gewonnen Dichten ergeben sich, ähnlich wie bei dem Filterdensitometer des FM19, im Gelb-Filter  $D_Y$  die größten Werte. Der insgesamt festgestellte Anstieg der Dichte in Bezug auf den ersten Messwert  $\Delta D_Y$  liegt mit  $\Delta D_Y \approx 0,06$  in der gleichen Größenordnung wie bei den Messungen mit dem Filterdensitometer des FM19.

In Abbildung 6-2 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte für die Dichte  $D_Y$  zusammenfassend dargestellt. Im Vergleich zu den Messwerten des Filterdensitometers des FM19 sind die ermittelten Werte nochmals geringer. Dies lässt sich auf das Fehlen eines Polfilters, der im europäischen Raum für die Dichtemessung vorgeschrieben ist und eine generelle Erhöhung der Dichtewerte nach sich zieht, zurückführen. Für Farbmessungen hingegen sind Polfilter nicht erlaubt und daher auch in Farbmessgeräten nicht implementiert. Da es sich darüber hinaus bei Polfiltern um physikalische Filter handelt, deren Einfluss bis heute noch nicht mathematisch simuliert werden kann, beziehen sich alle Ergebnisse, mit Ausnahme der für die Filterdensitometer, auf Messungen ohne Polfilter. Die Abbildung 6-2 dargestellten Ergebnissen zeigen darüber hinaus, dass die unterschiedlichen Messgeräte und Messgeometrien (vgl. die Ergebnisse CM2600d\_SCI mit CM2600d\_SCE) bei der Messung der gleichen Druckprobe zu sehr unterschiedlichen Messwerten führen. Dieser Umstand ist auf

unterschiedliche Messgrößen, verwendete Lichtquellen zur Beleuchtung der Probe, Messanordnungen und Messgeometrien zurückzuführen. Bei der Betrachtung der Messergebnisse dürfen somit nur die Messergebnisse, die mit einem Messgerät ermittelt wurden, direkt miteinander verglichen und hieraus Tendenzen abgeleitet werden.

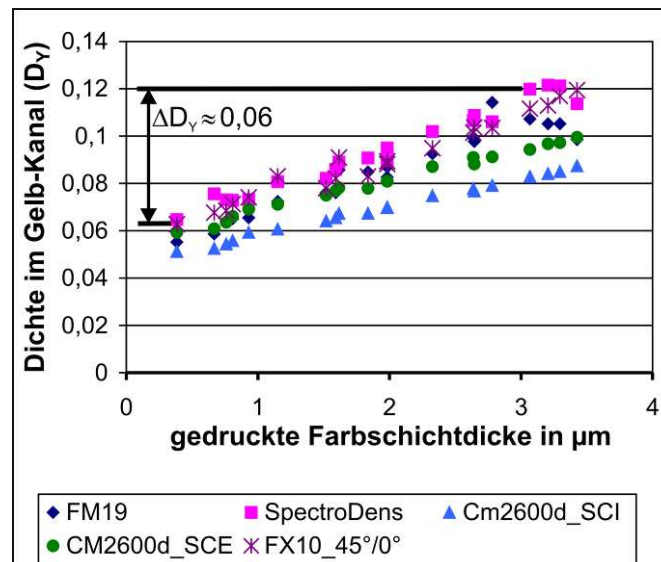


Abbildung 6-2: Dichte im Gelb-Kanal ( $D_Y$ ), gemessen mit den Farbmessgeräten FM19, Minolta CM2600d unter Glanzeinschluss (SCI) und mit Glanzausschluss (SCE), Spektrodens und FX10 (Messgeometrie:  $45^\circ/0^\circ$ ; Druckfarbe: LithoRed)

Auf Grundlage der oben gezeigten Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die Messergebnisse einer Dichtemessung mit handelsüblichen Filterdensitometern nicht für die Prozesskontrolle im Einzelfarbendruck gedruckter Interferenzeffektfarben geeignet sind. Darüber hinaus zeigt sich zwar eine leichte Zunahme der Dichte im Gelb-Kanal  $D_Y$  über den gesamten betrachteten Farbschichtdickenbereich. Im Offsetdruck erfolgt meist nur eine leichte Variation der gedruckten Farbschichtdicken zwischen ca.  $1\ \mu\text{m}$  und  $2\ \mu\text{m}$ . Für diesen Farbschichtdickenbereich reduziert sich die Veränderung mit  $\Delta D_Y \approx 0,02$  auf die durch die Messgerätehersteller angegebene Messgerätegenauigkeit. Somit ist auch hier die Eignung zur Prozesskontrolle negativ zu werten. Durch eine Erhöhung der Messgenauigkeit der Messgeräte, könnte jedoch in Zukunft vielleicht auch über die Erfassung der Dichte im Gelb-Kanal eine Prozesskontrolle möglich werden.

### 6.1.1 Dichtemessung ( $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$ ) anderer Messgeometrien

Im kommenden Abschnitt werden die Messwerte Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) hinsichtlich ihrer Eignung bei Verwendung anderer Messgeometrien betrachtet.

Aufgrund der Eigenschaften von Interferenzeffektpigmenten ist davon auszugehen, dass bei einer Messung nahe des Glanzwinkels die Effektfarbe in Erscheinung tritt. Diesbezüglich besteht die Möglichkeit, dass die Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) eine deutlich größere Veränderungen in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke aufzeigt, als dies für die Messgeometrie  $45^\circ/0^\circ$  bzw.  $0^\circ/45^\circ$  gezeigt werden konnte. Nachstehend werden exemplarisch die Messwerte für die Messgeometrien  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) und  $15^\circ/0^\circ$  (as15) als Repräsentanten für eine Beobachtung nahe am Glanzwinkel betrachtet.

Wie in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 zu sehen ist, ergeben sich für Messgeometrien mit einer Beobachtung nahe dem Glanzwinkel tendenziell abnehmende Dichtewerte bei einem Anstieg der gedruckten Farbschichtdicke. In Abhängigkeit des Ausgangswertes der Dichte bei sehr kleinen Farbschichtdicken, beispielsweise  $D_Y \approx 0,03$  bzw.  $D_K \approx 0$  bei beiden Messgeometrien, kann es für höhere Farbschichtdicken zu negativen Dichtewerten kommen.

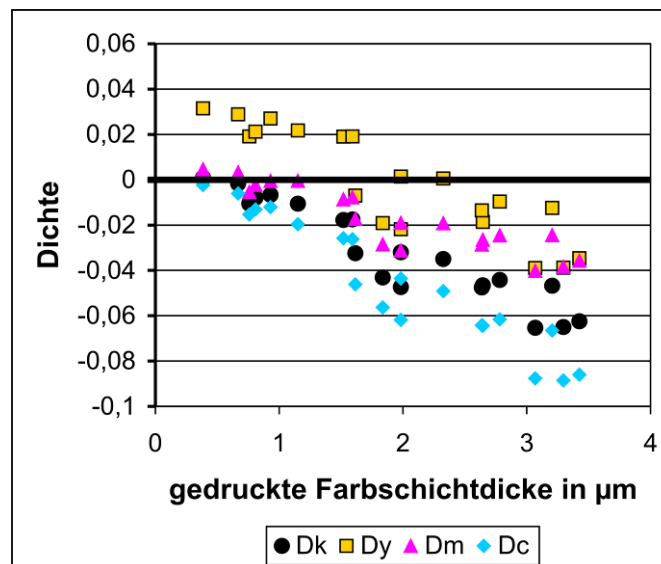


Abbildung 6-3: Messergebnisse der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) über der gedruckten Farbschichtdicke für die Messgeometrie  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) als Repräsentant für eine Beobachtung nahe dem Glanz; Druckfarbe: LithoRed



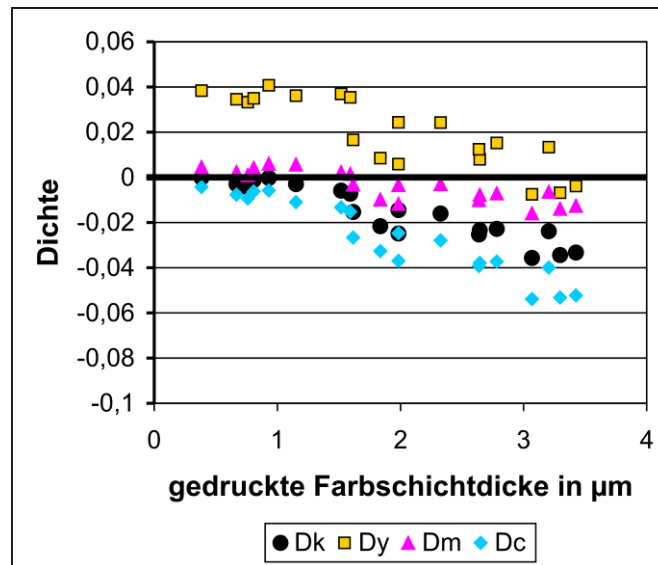


Abbildung 6-4: Messergebnisse der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) über der gedruckter Farbschichtdicke für die Messgeometrie  $15^\circ/0^\circ(\text{as}15)$  als Repräsentant für eine Beobachtung nahe dem Glanz; Druckfarbe: LithoRed

Erklärt werden kann das Auftreten negativer Dichtewerte durch eine Betrachtung der Remissionskurve und der zur Berechnung der Dichte genutzten Filterkurven, dargestellt am Beispiel einer gedruckten Farbschichtdicke von  $3 \mu\text{m}$  gemessen mit der Messgeometrie  $45^\circ/-30^\circ(\text{as}15)$  in Abbildung 6-5.

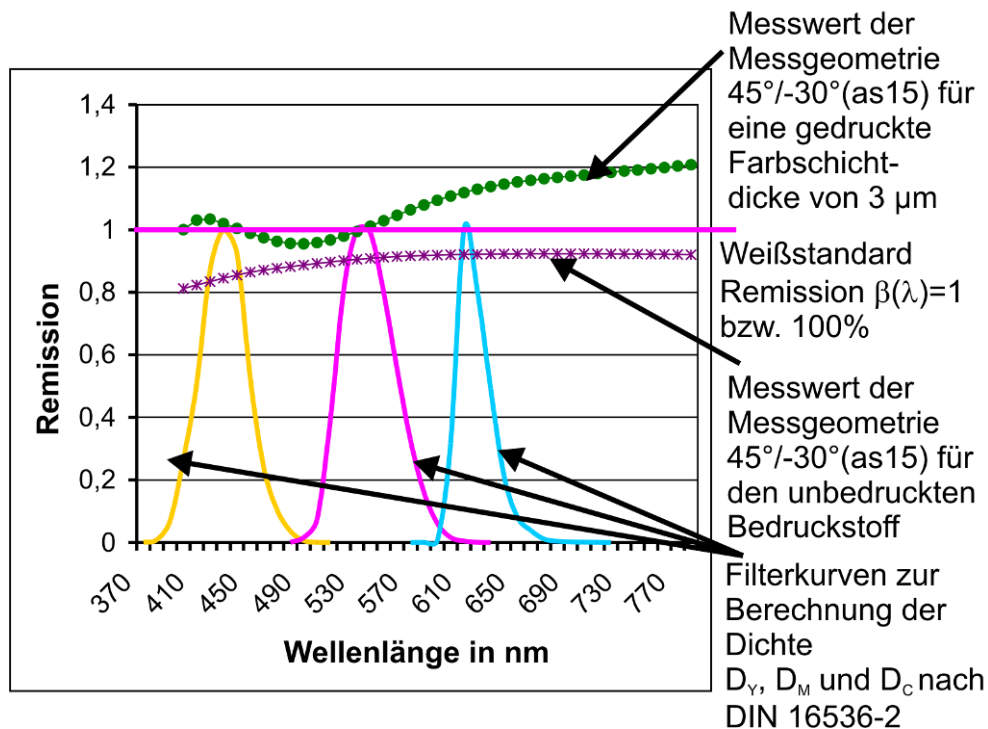


Abbildung 6-5: Darstellung der Remissionskurven des unbedruckten Bedruckstoffs, einer auf diesem Bedruckstoff gedruckten Farbschicht von 3  $\mu\text{m}$  sowie der Filterkurven zur Berechnung der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$ ); Druckfarbe: LithoRed

Die Ermittlung der Remissionskurve basiert auf der Kalibration des Messgerätes auf einem Weißstandard. Diesem Weißstandard werden die Eigenschaften eines Lambert-Reflektors, also eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Raumrichtungen und eine Remission  $\beta(\lambda) = 100\%$  zugeordnet. Interferenzpigmente zeigen jedoch ausgeprägte Reflexionseigenschaften in eine Vorzugsrichtung (Glanzwinkel), ähnlich denen eines Spiegels. Werden nun gedruckte Interferenzeffektfarben nahe des Glanzwinkels gemessen, kommt es im Vergleich zum Weißstandard zu größeren Remissionswerten, siehe Abbildung 6-5. Dies schlägt sich auch in der Dichte nieder. Die Berechnung der Dichte erfolgt durch die Bewertung der eingeschlossenen Fläche zwischen der jeweiligen Remissionskurve und der Filterkurve. Hierdurch werden für die bedruckte Probe die maximal möglichen Dichtewerte, für den Bedruckstoff jedoch geringere Dichtewerte berechnet. Da die Dichtewerte immer auf den Bedruckstoff bezogen werden, kommt es daher in Bezug auf den Bedruckstoff zu negativen Dichtewerten.

Die bei einer Betrachtung der Dichtewerte nahe dem Glanzwinkel auftretenden Sprünge der Dichte in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke, wie sie in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 insbesondere im Gelb-Kanal ( $D_Y$ ) zu sehen

sind, können auf die Veränderung der gemessenen Remissionskurven in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke zurückgeführt werden (Abbildung 6-6).

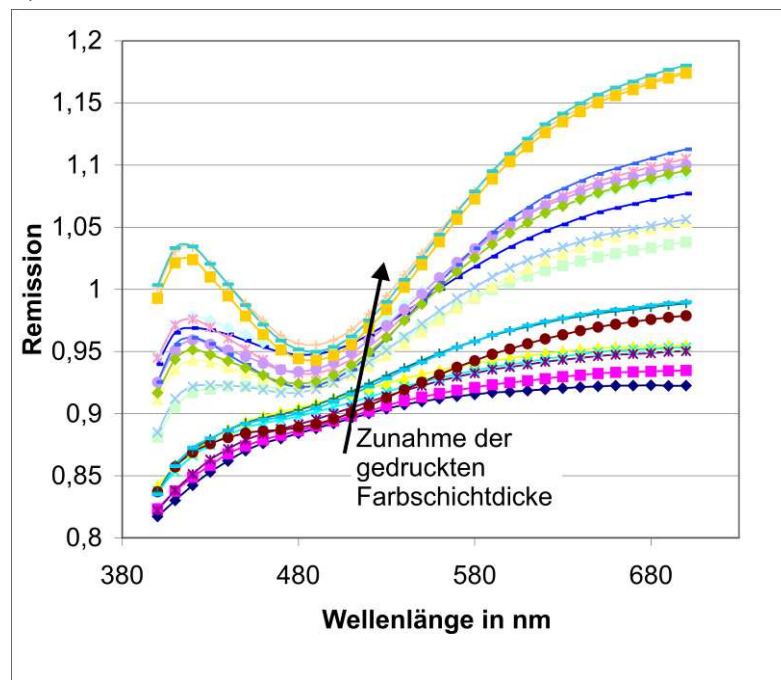


Abbildung 6-6: Veränderung der mit der Messgeometrie  $45^\circ/-30^\circ$  (as15) gemessenen Remissionskurve für Druckproben der Interferenzeffektfarbe LithoRed mit zunehmender gedruckter Farbschichtdicke.

Die Anwendung der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) für Messgeometrien mit einer Beobachtung nahe des Glanzes, wie z. B.  $45^\circ/-30^\circ$ (as15) und  $15^\circ/0^\circ$ (as15°), erscheint aufgrund des Auftretens negativer Werte als ungeeignet.

## 6.2 Messgröße ( $D_{\ddot{u}}$ ) aus dem Übereinanderdruck mit Schwarz

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt werden konnte, ist es mit der herkömmlichen Größen Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) nicht ausreichend genau möglich eine Änderung der Farbschichtdicke im Einzelfarbendruck gedruckter Interferenzeffektfarben zu charakterisieren. Dies ist auf die hohe Transparenz dieser Farben bei einer Betrachtung in einem großen Differenzwinkel zum Glanz zurückzuführen.

Bei einer visuellen Beobachtung unterschiedlicher Druckproben konnte festgestellt werden, dass bei einer Applikation der Interferenzeffektfarbe auf einem schwarzen Untergrund auch bei kleinen Farbschichtdicken ein Einfluss der Interferenzeffektfarbe deutlich zu sehen ist. Bei einer Betrachtung mit einem großen Differenzwinkel zum Glanz wurde insbesondere eine Aufhellung der Probe mit zunehmender Farbschichtdicke festgestellt. Diese Beobachtung wird im Folgenden genutzt um eine neue Messgröße zu entwickeln, welche zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben herangezogen werden kann.

Hierzu soll die experimentelle Analyse zunächst zeigen, ob sich der visuell beobachtete Effekt auch mittels der in der Druckindustrie verbreiteten Dichtemessung erfassen lässt. Da visuell insbesondere eine Aufhellung des untergedruckten Schwarz festzustellen ist, wird nachfolgend lediglich die Dichte im Schwarz-Kanal ( $D_K$ ) betrachtet. In einem zweiten Schritt wird aus den ermittelten Messwerten eine Möglichkeit zur Auswertung des durch den Überdruck der Interferenzeffektfarbe erzielten Effektes abgeleitet. Im letzten Schritt erfolgen eine Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse und eine Prüfung der Eignung für die Prozesskontrolle.

Abbildung 6-7 zeigt die Ergebnisse für den Übereinanderdruck der Interferenzeffektfarbe LithoRed auf Schwarz bei a) konstant gehaltener und bei b) variiert Farbschichtdicke. Darüber hinaus sind in Abbildung 6-7 die für den jeweiligen Fall ermittelten Dichtewerte des Einzelfarb-Druckbereichs der Druckfarbe Schwarz dargestellt.

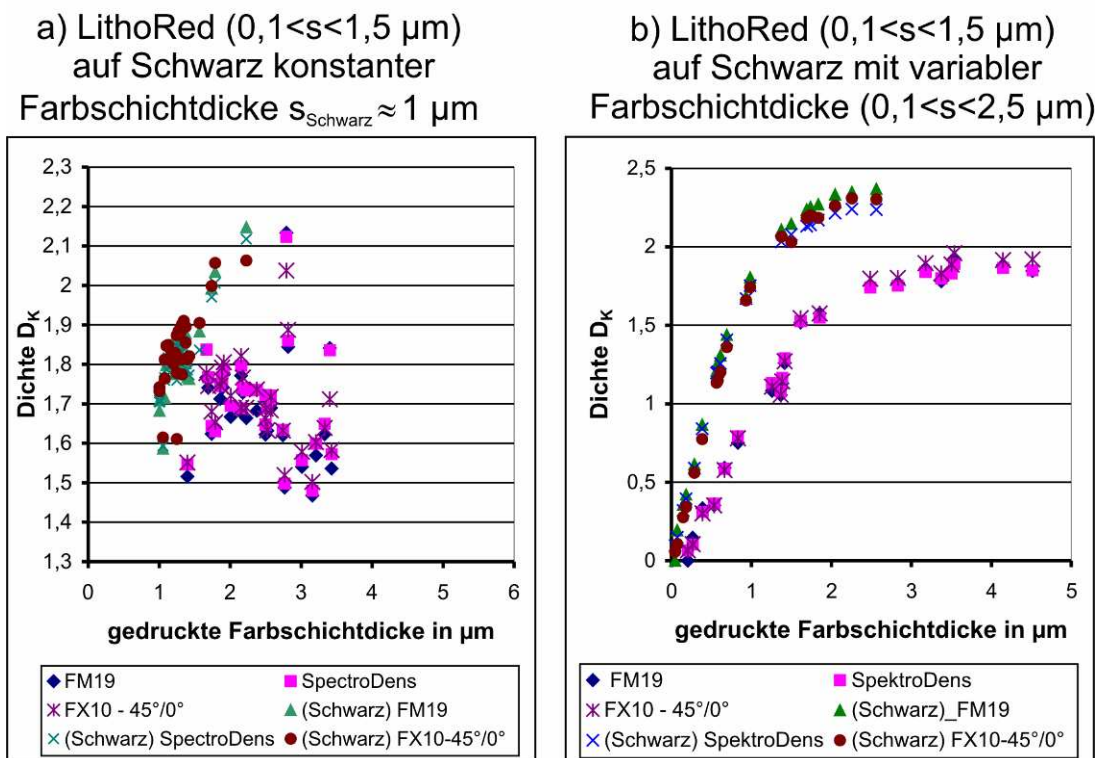


Abbildung 6-7: Dichte im Schwarzkanal  $D_K$  für den Übereinanderdruckbereich von LithoRed (mit einer variierenden Farbschichtdicke zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $1,5 \mu\text{m}$ ) auf Schwarz und den Einzelfarb-Druckbereich der Druckfarbe Schwarz. a) Schwarz mit konstanter Farbschichtdicke ( $s_{\text{Schwarz}} \approx 1$ ), b) Schwarz mit variierter Farbschichtdicke ( $0,1 < s_{\text{Schwarz}} < 1,5 \mu\text{m}$ )

Für den Übereinanderdruck auf einer nahezu konstanten Farbschicht Schwarz (Abbildung 6-7 a)) lässt sich eine Veränderung der Dichte  $D_K$  gegenüber des Schwarz im Einzeldruck erkennen. Im Vergleich zu den in Abbildung 6-7 b) dargestellten Ergebnissen des Übereinanderdrucks bei gleichzeitiger Veränderung der untergedruckten Druckfarbe Schwarz und der aufgedruckten Interferenzeffektfarbe ist diese jedoch nur schwer zu deuten. Im Fall einer Variation sowohl der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarbe als auch der Druckfarbe Schwarz zeigt sich eine deutliche Absenkung der ermittelten Dichte  $D_K$  gegenüber der Dichte des Schwarz im Einzeldruckendruck. Eine Messgröße zur Beschreibung dieser Veränderung lässt sich der Darstellung jedoch nicht entnehmen. Aufgrund der nur schwer identifizierbaren Veränderung bei einem Übereinanderdruck auf Schwarz konstanter Farbschichtdicke, wird im Folgenden nur noch auf den Übereinanderdruck bei gleichzeitiger Variation der Farbschichtdicke Schwarz und der

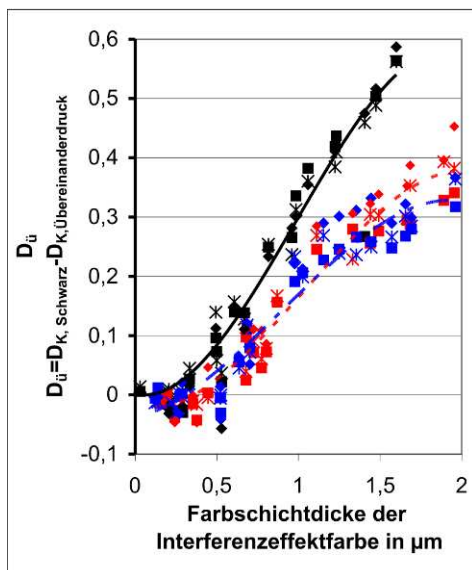
Interferenzeffektfarbe eingegangen. Ziel ist es für diesen Fall eine Möglichkeit zur Auswertung des Effektes und die Angabe eines Messwertes zu finden.

Der Modellgedanke, um dieses Ziel zu erreichen, beruht auf der Zuordnung des festgestellten Effektes zur Farbschichtdicke der aufgedruckten Interferenzeffektfarbe. Hierzu wird die festgestellte Aufhellung, die durch den Aufdruck der Interferenzeffektfarbe erzielt werden konnte, über eine Subtraktion der im Übereinanderdruckbereich gemessenen Dichte  $D_{K, \text{Übereinanderdruck}}$  von der im Absorptionsbereich gemessenen Dichte  $D_{K, \text{Schwarz}}$  berechnet (siehe Gl. (6.1)).

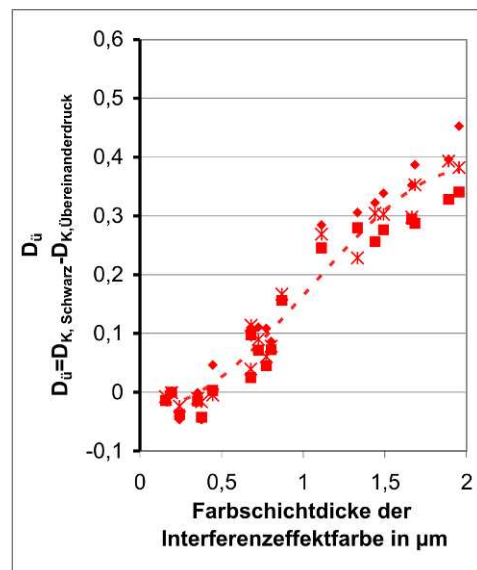
$$D_{\bar{u}} = D_{K, \text{Schwarz}} - D_{K, \text{Übereinanderdruck}} \quad (6.1)$$

Abbildung 6-8 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung für den Übereinanderdruck der Interferenzeffektfarben LithoRed, LithoBlue und LithoWhite auf Schwarz bei einer gleichmäßigen Variation der Farbschichtdicke beider am Prozess beteiligter Druckfarben.

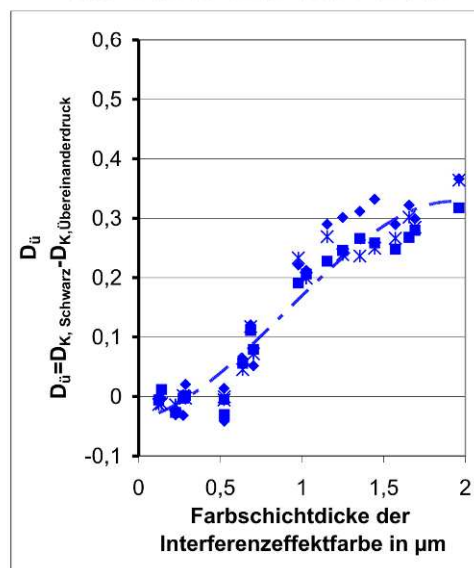
Alle drei betrachteten Interferenzeffektfarben zeigen für einen Farbschichtdickenbereich ( $s > 0,5 \mu\text{m}$ ) einen Anstieg des Effektes (Zunahme der Größe  $D_{\bar{u}}$ ). In Abhängigkeit der betrachteten Interferenzeffektfarbe ergeben sich dabei leichte Unterschiede, die mittels der Steigung der Trendlinie identifizierbar sind. Im Bereich kleiner Farbschichtdicken ( $s \leq 0,5$ ) ist für alle drei Interferenzeffektfarben eine Abnahme der Größe  $D_{\bar{u}}$  feststellbar. Diese lassen sich als eine Verdunklung der Proben interpretieren.



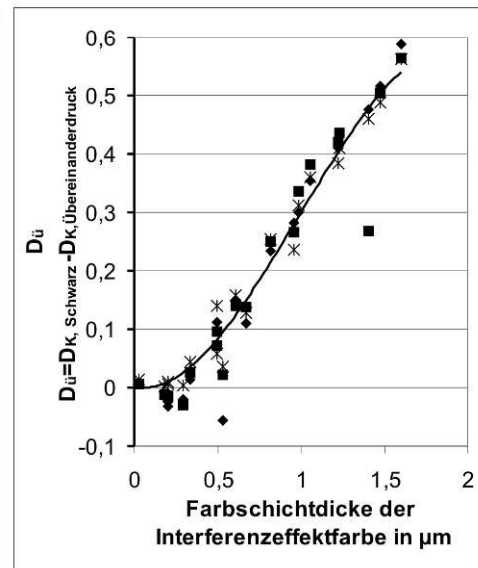
a) Zusammenfassung des Trends aller drei Farben



b) LithoRed



c) LithoBlue



d) LithoWhite



Abbildung 6-8: Darstellung der Größe  $D_u$  zur Beschreibung der durch die Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarbe bedingten Veränderung im Übereinanderdruck mit Schwarz (varierte Farbschichtdicken der Interferenzeffektfarben und des Schwarz), a) Zusammenfassung der Tendenzen aller drei Interferenzeffektdruckfarben, b) LithoRed, c) LithoBlue und d) LithoWhite

Die Auswertung der Messergebnisse durch die Größe  $D_{ii}$  hat generell eine Eignung zur Anwendung für die Prozesskontrolle gezeigt. Durch den Übereinanderdruck der Interferenzeffektfarbe mit der Absorptionsfarbe Schwarz und der sich anschließenden Messung der Dichte  $D_K$  des Übereinanderdruck- und des Einzelfarbendruck-Bereichs der Druckfarbe Schwarz lassen sich Aussagen über die Variation der Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarbe machen. Problematisch ist jedoch der Druck sehr kleiner Farbschichtdicken. Werden sehr kleine Farbschichten auf eine große Farbschicht der Absorptionsfarbe gedruckt, kann es zu Effekten der Farbrückspaltung kommen, die eine Aussage über den Einfluss der Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarbe unmöglich machen. Darüber hinaus bleibt der auftretende Effekt der Verdunklung der Proben bei der Farbübertragung kleiner Farbschichten beider Farben ungeklärt.

Ferner basieren die Erkenntnisse auf einem Übereinanderdruck mit Schwarz, da dieser bei visuellen Beobachtungen von Vorversuchen den größten Effekt infolge der aufgedruckten Interferenzeffektfarbe zeigte. Im Druck kann es aber vorkommen, dass die Druckfarbe Schwarz nicht am Druckprozess beteiligt ist.

Aus diesen Gründen ist eine Verwendung der Größe  $D_{berechnet}$  für die Prozesskontrolle nur unter der Voraussetzung von Farbschichtdicken  $s > 0,5 \mu\text{m}$  und einer gleichmäßigen Veränderung der Druckfarbe Schwarz und der Interferenzeffektdruckfarbe empfehlenswert.

### 6.3 Messgröße ( $L_H$ ) aus farbmétrischen Größen

Das für die Entwicklung der Messgröße  $L_H$  zugrundegelegte Modell basiert auf der Hypothese, dass eine aufgedruckte Farbschicht einer lasierenden Druckfarbe (z. B. Absorptions- und Interferenzeffektfarben), bei einer Betrachtung in einem großen Differenzwinkel zum Glanzwinkel (z. B.  $45^\circ/0^\circ$  bzw.  $0^\circ/45^\circ$ ), gegenüber dem unbedruckten Bedruckstoff zu einem dunkleren Farbeindruck führt. Hieraus leitet sich eine weitere Hypothese ab: Der dunklere Farbeindruck lässt sich mithilfe einer neuen Messgröße  $L_H (= L_{\text{Farbschicht}}^* - L_{\text{Bedruckstoff}}^*, \text{ CIELAB-Farbwert } L^*)$  angeben und als Messgröße zur Prozesssteuerung nutzen.

Im Folgenden soll auf Basis der experimentellen Analyse zunächst die Hypothese bezüglich der Verdunklung der Druckproben bei einer größer werdenden gedruckten Farbschicht validiert werden. Hierzu werden die Messergebnisse für gedruckte Interferenzeffektfarben am Beispiel von zwei



unterschiedlichen gedruckten Absorptionsfarben betrachtet. Daraufhin wird die für die Bildung der Messgröße  $L_H$  zugrundeliegende theoretische Überlegung aufgezeigt. Ferner erfolgt die Einführung einer allgemeingültigen Beschreibungsvorschrift für das Verhalten der neu gewonnenen Messgröße  $L_H$  bei einer Variation der Farbschichtdicke. In einem letzten Abschnitt erfolgt die Validierung der neuen Messgröße anhand der experimentellen Analyse des Drucks von Interferenzeffektfarben auf weiteren Bedruckstoffen.

### 6.3.1 Ergebnisse der experimentellen Analyse

Die experimentelle Analyse basiert auf der Messung der Remissionskurve mittels heute in der Druckindustrie üblicher Spektralfotometer (Messgeometrie:  $45^\circ/0^\circ$  bzw.  $0^\circ/45^\circ$ ). Die daraus gewonnenen Informationen werden nachfolgend mithilfe der in der Farbmeterik bekannten Gleichungen (Gl. 2.12) ausgewertet und im CIELAB-Farbsystem bewertet (Kapitel 2.4.2).

Beim CIELAB-Farbsystem handelt es sich um das bekannteste und in der Druckindustrie am häufigsten angewendete Farbsystem. Neben der Angabe der CIELAB-Farbwerte werden diese häufig in einem sogenannten Chroma-Diagramm ( $a^*/b^*$ -Diagramm) und auf einer Helligkeitsachse ( $L^*$ ) dargestellt. Diese Darstellung erlaubt jedoch nur bedingt eine Beurteilung der Veränderung bei einer Variation der gedruckten Farbschichtdicke. Daher wird im Folgenden auf diese Darstellung verzichtet und die einzelnen Farbwerte ( $L^*$  - Helligkeit,  $a^*$  – Grün - Rot,  $b^*$  - Blau - Gelb) getrennt voneinander, über der gedruckten Farbschichtdicke aufgetragen. Dies ermöglicht die Identifizierung von Gemeinsamkeiten bzw. Abweichungen bezüglich der einzelnen Farbwerte für unterschiedliche Druckfarben (Interferenzeffektfarben und Absorptionsfarben).

Zunächst erfolgt eine Betrachtung der drei gedruckten Interferenzeffektfarben LithoRed, LithoBlue und LithoWhite.

Der Farbwert  $a^*$  (Grün – Rot – Achse des CIELAB-Farbsystems) zeigt für die verschiedenen Messgeräte und die Druckfarben ein deutlich unterschiedliches Verhalten, siehe Abbildung 6-9. Bei einer alleinigen Betrachtung der Messergebnisse für LithoRed (Abbildung 6-9 a)) fallen insbesondere die Messwerte des Minolta-Messgerätes (CM2600d\_SCI und CM2600d\_SCE) auf. Sie zeigen im Vergleich zu den Messergebnissen der anderen Messgeräte Farbwerte  $a^*$  gegen null, also nahezu farblos, an. Die Farbwerte der anderen Messgeräte hingegen zeigen tendenziell eine Zunahme des Grün-Eindrucks bei

einer Steigerung der gedruckten Farbschichtdicke. Dieser zunehmende Grün-Eindruck steht im Einklang mit der Feststellung, dass bei großen Farbschichtdicken zunehmend die Gegenfarbe den Farbeindruck (Interferenzfarbe: Rot; Gegenfarbe: Grün) dominiert. Für die Druckfarbe LithoWhite (Abbildung 6-9c) zeigen die Messergebnisse des Techkon Spektrodens ein zu den anderen Messergebnissen tendenziell unterschiedliches Verhalten. Für die Messwerte dieses Messgerätes kann, ähnlich wie bei der Druckfarbe LithoRed, eine tendenzielle Abnahme des  $a^*$ -Wertes, also ein zunehmender Grün-Eindruck, festgestellt werden. Alle anderen Messwerte weisen jedoch einen nahezu konstanten Farbwert  $a^*$  auf. Lediglich für die Druckfarbe LithoBlue (Abbildung 6-9b) zeigt sich ein tendenziell ähnlicher Verlauf der Messwerte aller Messgeräte.

Der Vergleich des Farbwertes  $a^*$  der unterschiedlichen Druckfarben eines Messgerätes weist eine deutliche Abhängigkeit dieses Farbwertes von der Druckfarbe auf. Für die Druckfarbe LithoRed zeigt sich tendenziell eine Abnahme des  $a^*$ -Farbwertes bei ansteigender gedruckter Farbschichtdicke, der auf einen zunehmenden Grün-Eindruck schließen lässt. Für LithoBlue ergibt sich bis zu einer gedruckten Farbschichtdicke von  $s < 3 \mu\text{m}$  ein nahezu gleichbleibender Farbeindruck, darüber ist eine leichte Zunahme des  $a^*$ -Farbwertes zu sehen. Diese lässt sich mit einem leicht rötlicher werdenden Eindruck bzw. mit einer Abnahme des Grün-Eindrucks deuten. Für die Druckfarbe LithoWhite ist, bis auf die Messwerte des Spektrodens, ein nahezu konstanter  $a^*$ -Farbwert festzustellen.

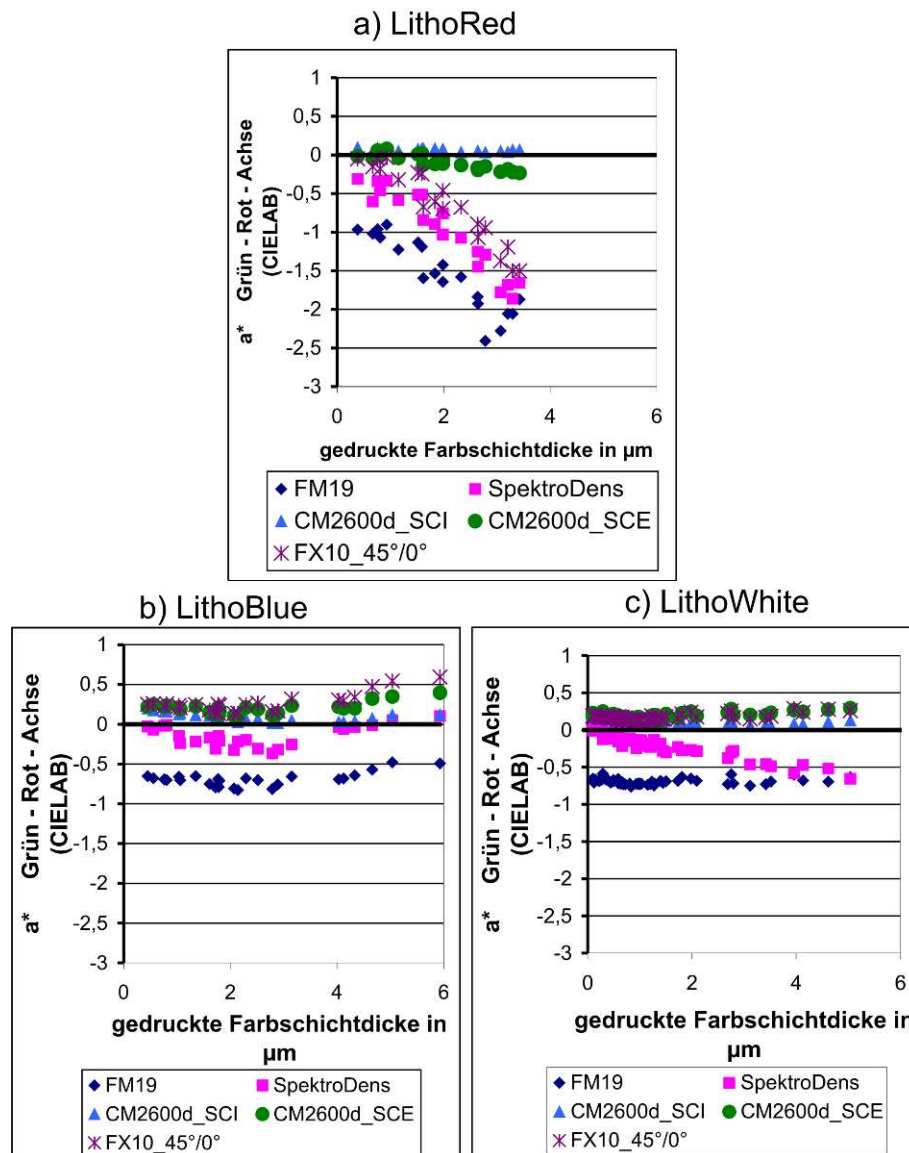


Abbildung 6-9: Darstellung des Farbwertes  $a^*$  (Grün – Rot - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarben a) LithoRed, b) LithoBlue und c) LithoWhite

Für den Farbwert  $b^*$  (Blau - Gelb – Achse des CIELAB-Farbsystems) ergibt sich ein deutlich einheitlicheres Bild (Abbildung 6-10). Sowohl die Messergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte als auch die der unterschiedlichen Druckfarben zeigen eine einheitliche Tendenz zu einer Zunahme des Gelb-Eindrucks auf. Diese Feststellung deckt sich mit den visuell festgestellten Beobachtungen. Die Messwerte der Druckfarbe LithoBlue zeigen die deutlichste Zunahme des  $b^*$ -Farbwertes ( $b^*_{\text{max, LithoRed}} = 10$ ). Dies lässt sich durch die Feststellung, dass die Gegenfarbe bei einer zunehmenden gedruckten Farbschichtdicke dominiert, begründen.

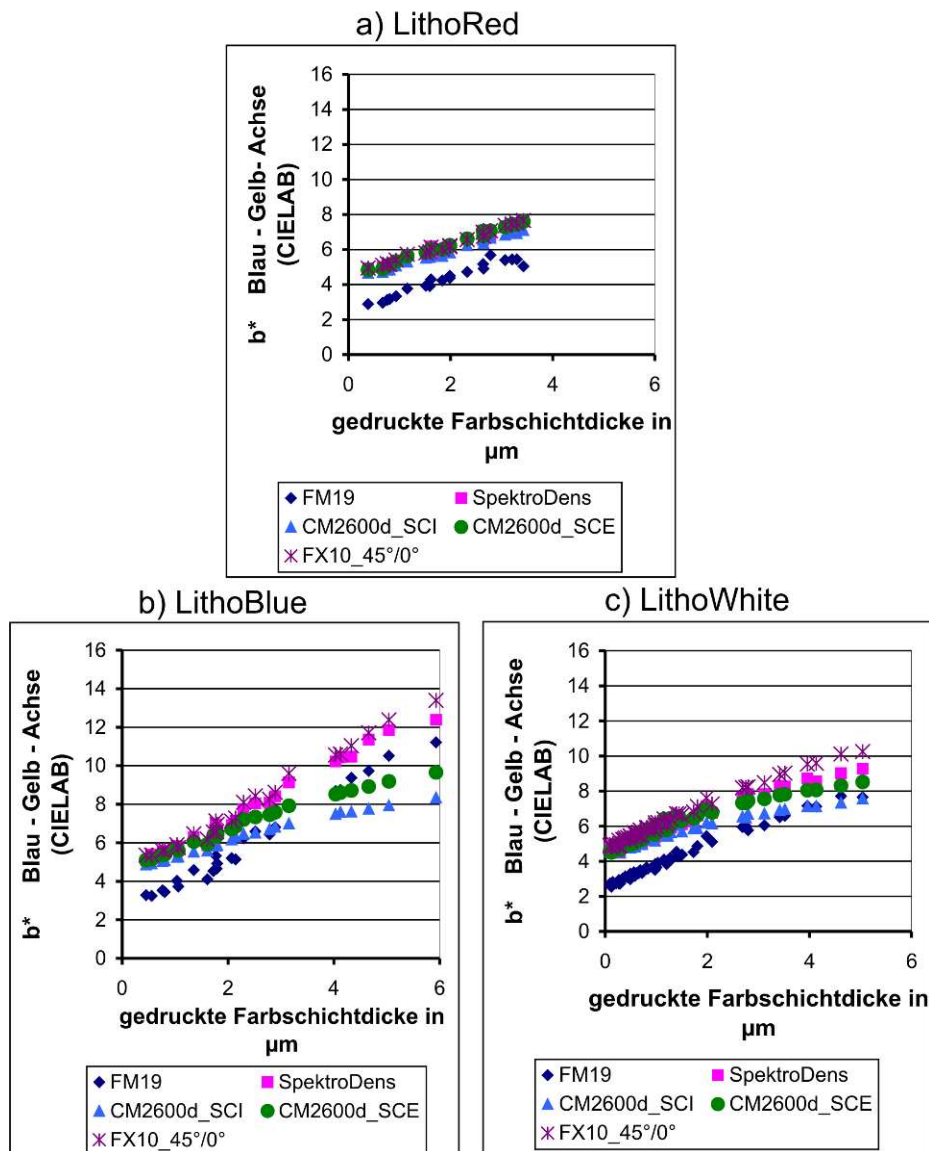


Abbildung 6-10: Darstellung des Farbwertes  $b^*$  (Blau – Gelb - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarben a) LithoRed, b) LithoBlue und c) LithoWhite

Der Farbwert  $L^*$  (Helligkeitsachse des CIELAB-Farbsystems) zeigt ebenso wie der  $b^*$ -Farbwert ein einheitliches Bild für die Messergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte und Druckfarben (Abbildung 6-11). Wie schon die visuelle Beobachtung zeigte, ergibt sich eine Abnahme des  $L^*$ -Farbwertes mit zunehmender gedruckter Farbschichtdicke. Die Stärke dieser Abnahme ist abhängig vom gewählten Messgerät und der Druckfarbe. Dies soll im Folgenden jeweils an einem Beispiel erläutert werden. Für die Druckfarbe LithoWhite (Abbildung 6-11c) ergibt sich für das Messgerät CM2600d sowohl mit (SCI) als auch ohne (SCE) Glanzeinschluss die geringste Veränderung des  $L^*$ -Farbwertes:

$\Delta L^*_{(0-5\mu\text{m}), \text{CM2600d}} \approx 1$  gegenüber  $\Delta L^*_{(0-5\mu\text{m}), \text{FM19}} = \Delta L^*_{(0-5\mu\text{m}), \text{SpektroDens}} = \Delta L^*_{(0-5\mu\text{m}), \text{FX10\_45°/0°}} \approx 5$ . Bei der Interferenzeffektfarbe LithoBlue wird für die Veränderung des  $L^*$ -Farbwertes, ermittelt mit dem Messgerät FM19, eine Abnahme um  $\Delta L^*_{(0-5\mu\text{m})} \approx 2,5$  festgestellt.

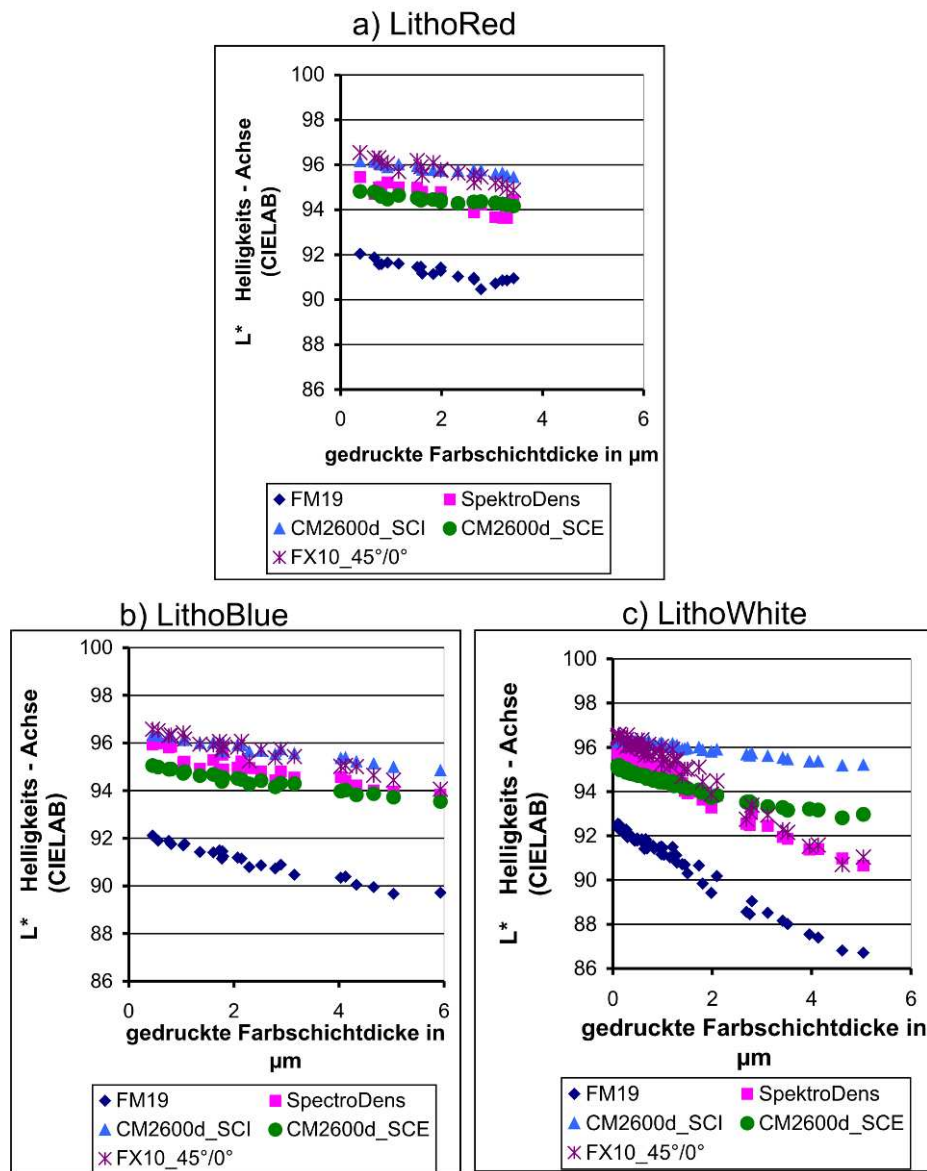


Abbildung 6-11: Darstellung des Farbwertes  $L^*$  (Helligkeits - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarben a) LithoRed, b) LithoBlue und c) LithoWhite

Am Beispiel von zwei mit variierender Farbschichtdicke gedruckter Absorptionsfarben (Magenta und Schwarz) soll nachfolgend das Verhalten dieser Druckfarben auf Gemeinsamkeiten mit dem Verhalten der Interferenzeffektfarben überprüft werden.

Der Farbwert  $a^*$  zeigt für die beiden Druckfarben Magenta (Abbildung 6-12a) und Schwarz (Abbildung 6-12b) ein deutlich unterschiedliches Ergebnis. Während es für die Druckfarbe Magenta eine deutliche Tendenz in Richtung „Rot“ bei einer Steigerung der gedruckten Farbschichtdicke aufzeigt, ist für die Druckfarbe Schwarz ein uneinheitliches Verhalten mit steigender gedruckter Farbschichtdicke feststellbar.

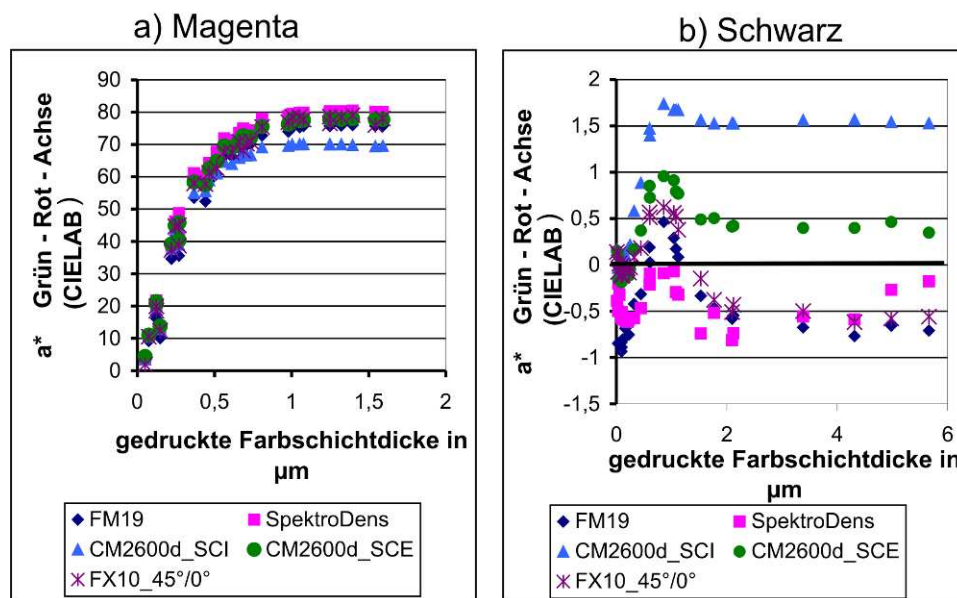


Abbildung 6-12: Darstellung des Farbwertes  $a^*$  (Grün – Rot - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Absorptionsfarben a) Magenta und b) Schwarz

Der Farbwert  $b^*$  zeigt für die beiden betrachteten Absorptionsfarben (Magenta und Schwarz) ebenfalls ein sehr unterschiedliches Verhalten. Während sich für die Druckfarbe Magenta (Abbildung 6-13a) ein eindeutiger Verlauf mit ansteigender Farbschichtdicke identifizieren lässt, ergibt sich für die Druckfarbe Schwarz wiederum ein uneinheitliches Verhalten (Abbildung 6-13 b)).

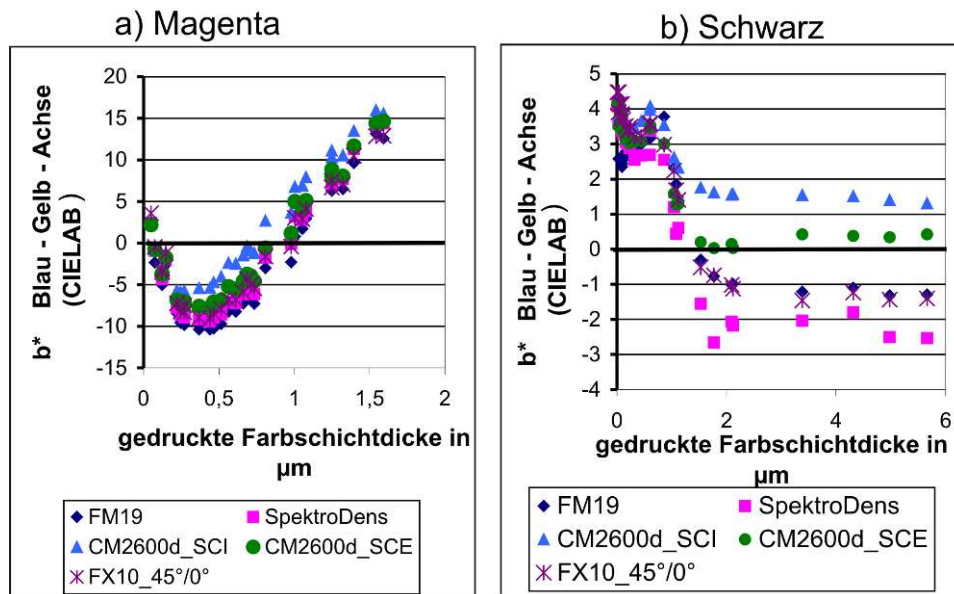


Abbildung 6-13: Darstellung des Farbwertes  $b^*$  (Blau – Gelb - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarben a) Magenta und b) Schwarz

Lediglich der Farbwert  $L^*$  zeigt ein einheitliches Verhalten für beide Druckfarben mit ansteigender gedruckter Farbschichtdicke, siehe Abbildung 6-14. Ausgehend von einem Helligkeitswert nahe 100 sinkt die Helligkeit mit größer werdender gedruckter Farbschichtdicke bis zu einer minimalen Helligkeit von  $L^* \approx 40$  bei Magenta und  $L^* \approx 2$  bei Schwarz ab. Abhängig von der jeweiligen Druckfarbe kann ab einer gedruckten Farbschichtdicke von  $s = 1,5 \mu\text{m}$  ein Sättigungseffekt festgestellt werden. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass sich ab dieser gedruckten Farbschichtdicke eine minimale Helligkeit einstellt. Bis zu dieser gedruckten Farbschichtdicke zeigt die Veränderung der Farbschichtdicken-Helligkeitskurve ein nahezu lineares Verhalten.



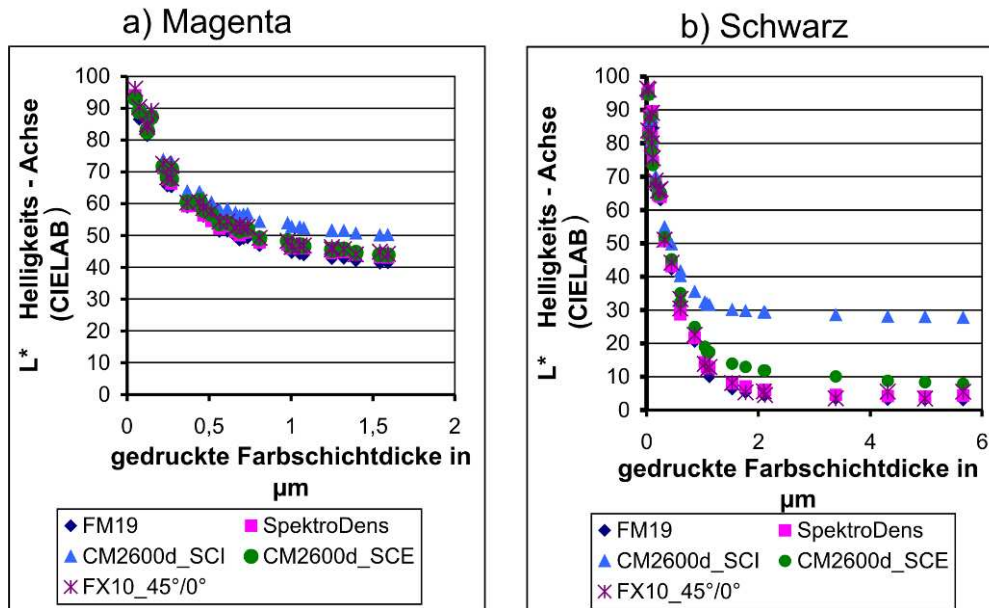


Abbildung 6-14: Darstellung des Farbwertes  $L^*$  (Helligkeits - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke der Interferenzeffektfarben a) Magenta und c) Schwarz

Zusammenfassend lässt sich für die Interferenzeffektfarben und die Absorptionsfarben sagen, dass lediglich der Farbwert  $L^*$  ein vergleichbares Verhalten aufzeigt. Im Gegensatz zu den gedruckten Absorptionsfarben (Abbildung 6-14) fällt jedoch die Abnahme der Helligkeit mit ansteigender gedruckter Farbschichtdicke bei Interferenzeffektfarben (Abbildung 6-11) mit nur ca. 5% im Vergleich zur Druckfarbe Schwarz deutlich kleiner aus. Ferner konnte für die gedruckten Farbschichtdicken der Interferenzeffektfarben kein Sättigungseffekt anhand einer minimalen Helligkeit festgestellt werden. Ob auch hier eine solche Sättigung eintritt, sollte daher durch den Farbauftrag sehr großer Farbschichten mittels Stufenspaltrakel geklärt werden.

Anhand der in Abbildung 6-15 dargestellten Ergebnisse kann gezeigt werden, dass auch für Interferenzeffektfarben bei sehr großen Farbschichtdicken für die Helligkeit  $L^*$  eine minimale Helligkeit festgestellt werden kann. Die Sättigung stellt sich aber, im Vergleich zu den Absorptionsfarben, erst bei deutlich größeren Farbschichtdicken ( $s > 30 \mu\text{m}$ ) ein. Für Farbschichtdicken  $s < 30 \mu\text{m}$  ist eine Abnahme der Helligkeit festzustellen.

Insgesamt lässt sich jedoch auch feststellen, dass sowohl für gedruckte Absorptionsfarben als auch für Interferenzeffektfarben das gleiche Verhalten bezüglich der Helligkeit  $L^*$  festgestellt werden kann.



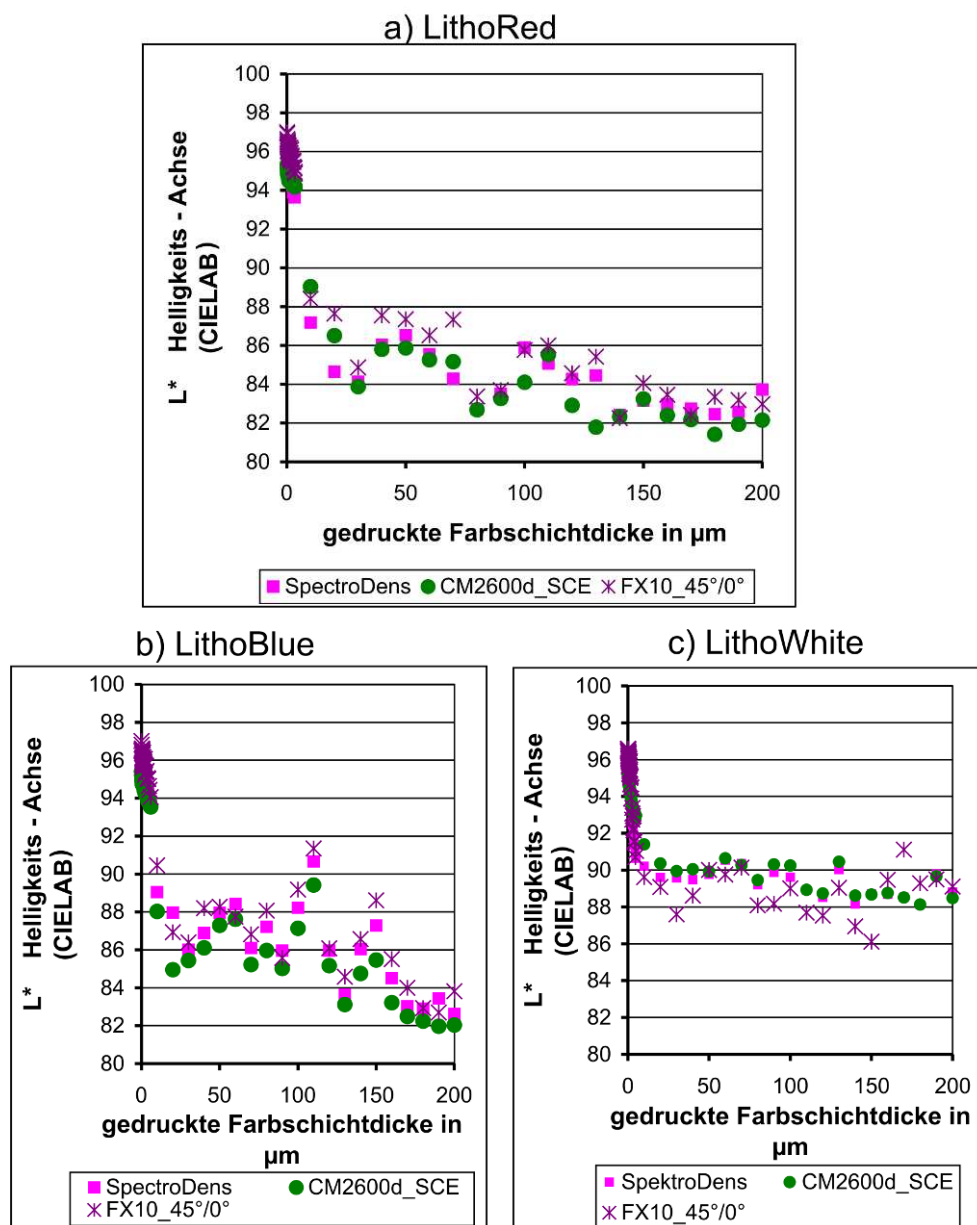


Abbildung 6-15: Darstellung des Farbwertes  $L^*$  (Helligkeits - Achse, CIELAB 1976) über der gedruckten Farbschichtdicke inklusive Druckproben erstellt mit einem Stufenspaltraket der Interferenzeffektfarben a) LithoRed, b) LithoBlue und c) LithoWhite

Helligkeitsveränderungen von  $\Delta L^* \approx 15$  für große Farbschichtdicken und  $\Delta L^* \approx 5$  für Farbschichtdicken  $s < 10 \mu\text{m}$ , machen eine Abschätzung und Untersuchung der Wiederholgenauigkeit der unterschiedlichen Messgeräte in Bezug auf die drei Farbwerte notwendig. Als problematisch stellt sich bei der Untersuchung die Angabe der Messgerätehersteller dar. In den Beschreibungen der Messgeräte wird die Wiederholgenauigkeit in  $\Delta E_{ab}$  angegeben. Der

Farbabstand  $\Delta E_{ab}$  berechnet sich nach Gl. (6.2), wobei hier die Ist-Werte durch die Wiederholmessung und der Soll-Wert durch die vorgegebenen Farbwerte des Weißstandards gegeben sind. In die Berechnung des Farbabstands gehen dabei alle drei Farbwerte ( $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ ) gleichermaßen ein. Eine Angabe der Abweichungen für einzelne Farbwerte ist nicht angegeben.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_{Ist}^* - L_{Soll}^*)^2 + (a_{Ist}^* - a_{Soll}^*)^2 + (b_{Ist}^* - b_{Soll}^*)^2} \quad (6.2)$$

Der Farbabstand  $\Delta E_{ab}$  erlaubt jedoch eine Abschätzung der maximal möglichen Veränderungen der einzelnen Farbwerte. Die maximal mögliche Abweichung eines Farbwertes (z. B.  $\Delta L_{max}^*$ ) ergibt sich aus  $\Delta E_{ab}$ , wenn für die beiden anderen Farbwerte keine Abweichung zum Sollwert (z. B.  $\Delta a^* = \Delta b^* = 0$ ) festzustellen ist. Die mittlere Abweichung ergibt sich für alle drei Farbwerte, wenn für alle drei Farbwerte die gleiche Abweichung zugelassen wird. Sie errechnet sich nach Gl. (6.3).

$$\begin{aligned} \text{Annahme: } \Delta L^* &= \Delta a^* = \Delta b^* \\ \Rightarrow \Delta E_{ab} &= \sqrt{3(\Delta L^*)^2} \Leftrightarrow \Delta L^* = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \Delta E_{ab} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Neben der Abschätzung der maximalen und mittleren Abweichungen der Farbwerte aus dem angegebenen Farbabstand wurden die einzelnen Farbwerte hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit experimentell überprüft. Tabelle 6-1 zeigt zusammenfassend den durch den Messgerätehersteller angegebenen Farbabstand  $\Delta E_{ab}$ , die Ergebnisse der theoretischen Überlegungen und die der experimentell ermittelten Resultate.

*Tabelle 6-1: Experimentelle Untersuchung der Wiederholgenauigkeit in Hinblick auf die Farbwerte  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$*

Messgerät	$\Delta E_{ab, \text{Hersteller}}$	theoretisch		experimentell ermittelte Abweichungen			
		maximale Abweichung	mittlere Abweichung	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E_{ab, \text{max}}$
		$\Delta L^*_{\text{max}},$ $\Delta a^* = \Delta b^* = 0;$ $\Delta a^*_{\text{max}},$ $\Delta L^* = \Delta b^* = 0;$ $\Delta b^*_{\text{max}},$ $\Delta L^* = \Delta a^* = 0$	$\Delta L^* = \Delta a^* = \Delta b^*$				
Techkon:	0,3	0,3	0,173	0,200	0,040	0,110	0,211
FX10:	0,15	0,15	0,087	0,100	0,020	0,100	0,096
Minolta_SCE:	0,04	0,04	0,023	0,011	0,028	0,018	0,022
Minolta_SCI:	0,04	0,04	0,023	0,011	0,011	0,012	0,014
FM19:	0,25	0,25	0,144	0,088	0,038	0,051	0,099

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung bezüglich der Angabe der Messgerätehersteller und dem experimentell ermittelten Farbabstand. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass der Farbwert  $a^*$  bei allen Messgeräten den kleinsten Beitrag und die Abweichung bezüglich des  $L^*$ -Farbwertes den größten Beitrag stellt. Über alle Messgeräte betrachtet ergibt sich daraus eine maximale Abweichung  $\Delta L^*_{\max} = \Delta a^*_{\max} = \Delta b^*_{\max} = 0,3$ .

Werden nochmals die Messergebnisse der gedruckten Interferenzeffektfarben betrachtet, ergeben sich für alle drei Farbwerte für sehr kleine Farbschichtdicken ( $s < 0,2 \mu\text{m}$ ) Veränderungen in der Größenordnung der Messunsicherheiten. Für größere gedruckte Farbschichtdicken ( $s > 0,2 \mu\text{m}$ ) können jedoch die festgestellten Veränderungen eindeutig auf die Variation der gedruckten Farbschichtdicke zurückgeführt werden.

### 6.3.2 Dichtemessung gedruckter Farbschichten (Modell)

Es stellt sich die Frage bezüglich der Übertragung der zuvor dargestellten Ergebnisse in ein geeignetes Verfahren zur Prozesskontrolle. Hierzu soll zunächst die heutige Vorgehensweise, der Dichtemessung, bezüglich Absorptionsfarben betrachtet werden.

Durch die Dichtemessung kann ein direkter Zusammenhang zwischen der aufgedruckten Farbschichtdicke und der gemessenen Dichte angegeben werden. Da zu Beginn der Messung eine Kalibrierung des Messgerätes auf dem jeweiligen unbedruckten Bedruckstoff erfolgt, ist dieser Zusammenhang unabhängig von der Farbwirkung des unbedruckten Bedruckstoffs. Bei der Kalibrierung wird die Remission des Bedruckstoffs mit  $\beta = 1$  bzw.  $\beta = 100 \%$  definiert. Dies entspricht einer Umrechnung mit dem Faktor  $k = 1/\beta_{\text{Bedruckstoff}}$ . Für die Dichte des unbedruckten Bedruckstoffs ergibt sich hieraus  $D = 0$  [TEC06]. Die Dichte der gedruckten Farbschicht ergibt sich im Folgenden aus Gl. (6.4).

$$D = -\lg(\beta_{\text{Farbschicht}} \cdot k) = -\lg\left(\beta_{\text{Farbschicht}} \cdot \frac{1}{\beta_{\text{Bedruckstoff}}}\right) \quad (6.4)$$

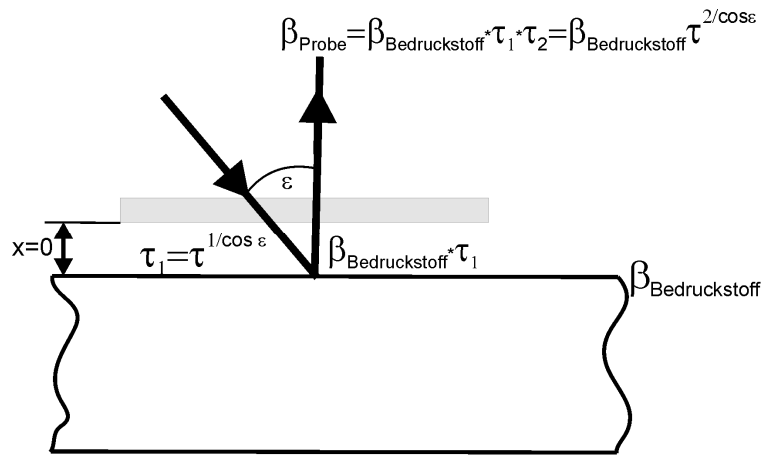
Bei einer Farbmessung hingegen erfolgt die Kalibrierung immer auf ein Bezugsweiß, den sogenannten Weißstandard. Die Remission dieses Bezugsweiß wird in diesem Fall mit  $\beta = 1 = 100 \%$  beziehungsweise auf die Standardwerte des Bezugsweiß festgelegt. Hierdurch wird im Falle der Farbmessung immer der

Einfluss der Farbwirkung des Bedruckstoffs mit erfasst. Daher ist bei transluzenten bzw. transparenten Farben somit immer in Abhängigkeit von der aufgetragenen Farbschichtdicke die Bedruckstofffarbe an der Farbwirkung beteiligt.

Abbildung 6-16 zeigt ein Modell zur Beschreibung der Vorgänge der Lichttransmission und -reflexion einer auf einen Bedruckstoff gedruckten Absorptionsdruckfarbe. Sie basiert auf dem transluzenten Charakter der Druckfarben, aufgrund dessen ihr Verhalten vereinfachend durch das von Farbfiltren (Transmissionsgrad  $\tau$ ) beschrieben werden kann. Daneben wird in diesem Modell davon ausgegangen, dass eine Reflexion lediglich am Bedruckstoff ( $\beta_{\text{Bedruckstoff}}$ ) erfolgt. Anhand dieser Annahmen lässt sich die Veränderung der eingestrahnten Intensität ( $I_{\text{ein}}$ ) durch die gedruckte Farbschicht ( $\tau$ ) und den Bedruckstoff ( $\beta_{\text{Bedruckstoff}}$ ) mithilfe des Remissionsgrades der Probe ( $\beta_{\text{Probe}}$ ) nach Gl. (6.5) beschreiben. Hierbei ergibt sich bei einer vereinfachten Betrachtung eine Hintereinanderschaltung von zwei Farbfiltren mit  $\tau_1$  und  $\tau_2$  die Remission der Probe nach Gleichung (6.5).

$$\beta_{\text{Probe}} = \beta_{\text{Bedruckstoff}} \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (6.5)$$

Unter der Annahme, dass der unter einem Winkel  $e$  durch die Farbschicht tretende Lichtstrahl einen Farbfilter gleicher Färbung (Pigmentkonzentration und Extinktionskoeffizient sind gleich) durchdringt, wie bei einer senkrechten Durchstrahlung, lässt sich mit Hilfe der geometrischen Beziehungen und des Lambert-Beer'schen Gesetzes [BER04] die Transmission  $\tau_1$  aus der Transmission  $\tau = \tau_2$  bei senkrechter Durchstrahlung angeben.



Annahmen:

1. Die Druckfarbe verhält sich wie ein Farbfilter:  
Beschreibung durch den Transmissionsgrad  $\tau$  bei senkrechter Durchstrahlung
2. Eine Reflexion findet nur am Bedruckstoff statt:  
Beschreibung durch den Remissionsgrad  $\beta_{\text{Bedruckstoff}}$

Abbildung 6-16: Modell für die Vorgänge bezüglich Lichttransmission und -reflexion einer gedruckten Absorptionsdruckfarbe

An diesem Modell lässt sich erkennen, dass die Reflexionseigenschaften des Bedruckstoffs einen direkten Einfluss auf das Messergebnis einer Dichte- oder Farbmessung haben.

Die Eliminierung des Einflusses der Reflexion des unbedruckten Bedruckstoffs ( $\beta_{\text{Bedruckstoff}}$ ) bei der Farbmessung kann mithilfe des in Abbildung 6-16 dargestellten Modells erläutert werden. Durch die Kenntnis des Remissionsgrades der Probe ( $\beta_{\text{Probe}}$ ) und des Remissionsgrades des unbedruckten Bedruckstoffs ( $\beta_{\text{Bedruckstoff}}$ ) kann durch Division beider Remissionsgrade der Einfluss der Transmissionseigenschaften der Farbschicht ( $\tau^{2 \cos \alpha}$ ) errechnet werden, siehe Gl. (6.6).

$$\tau^{2/\cos\alpha} = \frac{\beta_{\text{Probe}}}{\beta_{\text{Bedruckstoff}}} \quad (6.6)$$

Dabei sind die Transmissionseigenschaften direkt von der gedruckten Farbschichtdicke abhängig. Da bei einer Messung einer gedruckten Farbschicht immer von der Erfassung der Remission ausgegangen wird, werden die nach Gl. (6.6) errechneten Eigenschaften der Farbschicht ( $\tau^{2/\cos\alpha}$ ) im Folgenden als Remissionsquotient  $\beta_H$  bezeichnet. Mit diesem Remissionsquotienten ist es möglich durch die in Kapitel 2.4.1 angegebenen Gleichungen (Gl. 2.12 und Gl. 2.13, siehe Kapitel 2.4.1) die CIELAB-Farbwerte zu berechnen. Im Gegensatz zu einer direkten Auswertung der gemessenen

Remissionseigenschaften  $\beta_{probe}$  wird bei der Verwendung des Remissionsquotienten  $\beta_H$  der Koordinatenursprung des  $a^*/b^*$ -Diagramms des CIELAB-Farbsystems durch die Farbwirkung des Bedruckstoffs gegeben. Darüber hinaus entspricht der Maximalwert  $L^* = 100$  der Helligkeit des unbedruckten Bedruckstoffs.

Für die Ermittlung der Remissionseigenschaften werden heute vorwiegend Spektralfotometer eingesetzt. Neben diesen Messgeräten kommen zum Teil jedoch auch Dreibereichsmessgeräte zum Einsatz. Im Gegensatz zu Spektralfotometern liefern Dreibereichsmessgeräte als Ausgangswerte die Normspektralwerte  $XYZ$ , die anschließend meist in das CIELAB-Farbsystem umgerechnet werden.

Bei der Verwendung des CIELAB-Farbsystems als Basis des Modells ist es nicht mehr möglich den Einfluss des Bedruckstoffs durch Division der Remissionsgrade zu eliminieren. Hier muss demnach ein anderes Vorgehen für die vom unbedruckten Bedruckstoff unabhängige Betrachtung gewählt werden.

Wie bereits in dem zuvor dargestellten Modell wird auch hier davon ausgegangen, dass sich die Druckfarbschicht wie ein Farbfilter auf den Bedruckstoff legt. Für alle Messungen bleibt nach dieser Annahme die Farbwirkung des Bedruckstoffs gleich. Daher lassen sich die CIELAB-Farbwerte des Bedruckstoffs ( $L^*_{Bedruckstoff}$ ,  $a^*_{Bedruckstoff}$  und  $b^*_{Bedruckstoff}$ ) als Basisfarbwerte interpretieren.

Zu diesen Basis-Farbwerten lassen sich die gemessenen Farbwerte der bedruckten Proben ( $L^*_{Probe}$ ,  $a^*_{Probe}$ ,  $b^*_{Probe}$ ) in Beziehung setzen, um eine vom Bedruckstoff unabhängige Veränderung der Farbwerte durch die aufgedruckte Farbschicht festzustellen. Hierzu wird der jeweilige Farbabstand der Probe in den einzelnen Richtungen betrachtet. Die Bildung der einzelnen Größen erfolgt dabei entsprechend der in Gl. (6.7) angegebenen Vorschrift.

$$\begin{aligned}\Delta L^*_{PB} &= L^*_{Probe} - L^*_{Bedruckstoff} \\ \Delta a^*_{PB} &= a^*_{Probe} - a^*_{Bedruckstoff} \\ \Delta b^*_{PB} &= b^*_{Probe} - b^*_{Bedruckstoff}\end{aligned}\tag{6.7}$$

Abbildung 6-17 veranschaulicht die Bildung der zuvor eingeführten Größen anhand des CIELAB-Farbraums. Dargestellt sind zwei unterschiedliche Proben (■ Probe 1 und ♦ Probe 2). Diese zeigen in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke einen im Vergleich zum Bedruckstoff zunehmend dunkler und violetter (bläulicher und gleichzeitig rötlicher) werdenden Farbeindruck. Wenn

für beide Proben der gleiche Bedruckstoff verwendet wird, ist die Größe der Veränderung nur von der Lage des Farbortes der Proben abhängig und stellt somit eine direkte Beziehung zur aufgedruckten Farbschichtdicke her.

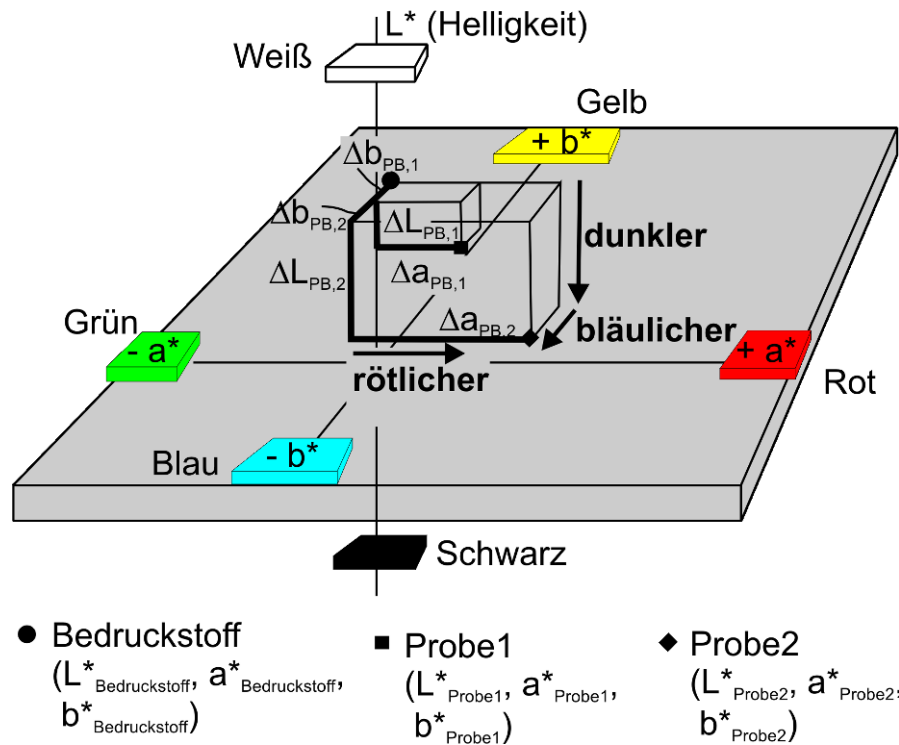


Abbildung 6-17: Veranschaulichung der Berechnung der Größen  $\Delta L_{PB}$ ,  $\Delta a_{PB}$  und  $\Delta b_{PB}$  im CIELAB-Farbraum

Wird als Ausgangsbasis der Remissionsquotient  $\beta_H$  verwendet lassen sich die Veränderungen der Größen  $a^*$  und  $b^*$ , aufgrund der Lage der Farbwerte für den unbedruckten Bedruckstoff im Nullpunkt direkt aus den in CIELAB überführten Farbwerten ablesen. Für die Betrachtung der Veränderung der Helligkeit muss zusätzlich die Differenz, siehe Gl. (6.8), gebildet werden, da hier die Helligkeit des Bedruckstoffs per Definition den CIELAB-Farbwert  $L^*_{\text{Bedruckstoff}} = 100$  ergibt.

$$\Delta L_{PB} = L^*_{\beta_H} - 100 \quad (6.8)$$

Für Interferenzeffektfarben lässt sich bei einer Betrachtung außerhalb des Glanzwinkels von ähnlichen Verhältnissen ausgehen. Während die Farbwirkung im Glanzwinkel insbesondere durch die Interferenzerscheinungen durch Reflexion bestimmt ist, ergibt sich bei einer Betrachtung außerhalb des Glanzwinkels der Farbeindruck durch die Interferenzerscheinungen der Transmission und der Reflexion am Bedruckstoff. Ein detailliertes Modell zur

Beschreibung der Farbwirkung sowohl in als auch außerhalb des Glanzwinkels in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke wurde bereits in Kapitel 5.2 dargestellt. An dieser Stelle wird sich auf die Feststellung beschränkt, dass auch für Interferenzeffektfarben bei einer Betrachtung außerhalb des Glanzwinkels von ähnlichen Verhältnissen wie bei Absorptionsfarben ausgegangen werden kann.

### 6.3.3 Nutzen der Messgröße $L_H$ zur Prozesskontrolle

Unter Ausnutzung der Erkenntnisse aus Kapitel 6.3.2 wird im Folgenden die Messgröße  $L_H$  (Helligkeitsdifferenz zum Bedruckstoff) als neue Messgröße zur Prozesskontrolle eingeführt. Hierzu wird zunächst eine Definition dieser Messgröße angegeben. Nachfolgend erfolgt eine Gegenüberstellung der aus der Remission und der mithilfe der CIELAB-Farbwerte berechneten Größe  $L_H$  am Beispiel der Druckfarben LithoWhite und Schwarz. Abschließend wird aus den dargestellten Ergebnissen eine mathematische Berechnungsvorschrift für den Zusammenhang zwischen der neuen Messgröße  $L_H$  und der gedruckten Farbschichtdicke abgeleitet.

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 dargestellt wurde, zeigt nur der Farbwert  $L^*$  für alle betrachteten Druckfarben (Absorptionsfarben: Magenta und Schwarz; Interferenzeffektfarben: LithoRed, LithoBlue und LithoWhite) ein einheitliches Verhalten. Sowohl der Farbwert  $a^*$  als auch der Farbwert  $b^*$  weisen in ihrem Verhalten eine deutliche Abhängigkeit von dem gedruckten Farbton auf. Beispielsweise ist für die Interferenzeffektfarbe LithoRed nur eine geringe Veränderung mit größer werdender gedruckter Farbschichtdicke im Farbwert  $a^*$  festzustellen. Für die Absorptionsdruckfarbe Magenta hingegen ergibt sich eine sehr große Veränderung in diesem Farbwert. Aufgrund dessen erscheint auch eine Betrachtung des Farbabstands  $\Delta E_{ab}$  als nicht sinnvoll. Für die Prozesskontrolle erscheint aus diesen Gründen lediglich die Helligkeit  $L^*$  als geeignete Größe.

Um eine Unabhängigkeit der Größe vom jeweiligen Bedruckstoff zu gewährleisten, wird auf die in Kapitel 6.3.2 dargestellte Umrechnung zurückgegriffen, wobei hier sowohl die Berechnung anhand der Remission (Spektralfotometer) als auch die aus den CIELAB-Farbwerten gleichberechtigt nebeneinander verwendet werden können. Zur Abgrenzung der neuen Messgröße von bereits bekannten Messgrößen wird sie mit einer Kennzeichnung



versehen. Der Index H wird hierbei als Synonym für die Bildung der Helligkeitsdifferenz zum Bedruckstoff verwendet. Die neue Messgröße  $L_H$  ist nach Gl. (6.9) definiert als

$$\begin{aligned} L_H &= \Delta L_{PB}^* = L_{\text{Probe}}^* - L_{\text{Bedruckstoff}}^* \quad \text{bzw.} \\ L_H &= L_{\beta_H}^* - 100 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Abbildung 6-18 zeigt die Gegenüberstellung der aus den Messwerten der Druckfarben LithoWhite und Schwarz mittels der in Gl. (6.9) angegebenen Varianten berechnete Größe  $L_H$ . Auf beide Arten kann das gleiche Verhalten angewendet werden. Bei einem direkten Vergleich lässt sich jedoch ein Unterschied feststellen. Für die Druckfarbe LithoWhite ergibt sich eine Abweichung von 0,36 zwischen der aus den CIELAB-Farbwerten errechneten Größe  $L_H$  und dem aus dem Remissionsquotienten  $\beta_H$  berechneten Werten. Für die Druckfarbe Schwarz ergibt sich für kleine gedruckte Farbschichtdicken ( $s < 0,1 \mu\text{m}$ ) eine Abweichung ähnlicher Größenordnung. Für größer werdende gedruckte Farbschichtdicken nimmt diese Abweichung zwischen den beiden Berechnungsarten jedoch bis auf 3,5 für eine Farbschichtdicke von  $2 \mu\text{m}$  zu. Werden zusätzlich die absoluten Werte der Größe  $L_H$  verglichen, so beträgt die Abweichung zwischen den beiden Berechnungsarten für Schwarz weniger als 10%. Für die Interferenzeffektfarbe hingegen ist bei dieser Betrachtung für gedruckte Farbschichtdicken bis  $2 \mu\text{m}$  eine Abweichung von ca. 30 % festzustellen. Für größere gedruckte Farbschichtdicken ( $s > 2 \mu\text{m}$ ) nimmt diese prozentuale Abweichung bis auf eine Abweichung kleiner 10 % ab. Zurückgeführt werden kann die Abweichung auf Messunsicherheiten der Messgeräte und getroffene Vereinfachungen. So wurden in dem Modell drucktechnische Vorgänge, wie z. B. das Wegschlagen der Druckfarbe in den Bedruckstoff oder eine unvollständige Farbübertragung innerhalb des Messflecks, welche die Farbwirkung der gedruckten Farbschicht beeinflusst, nicht erfasst.

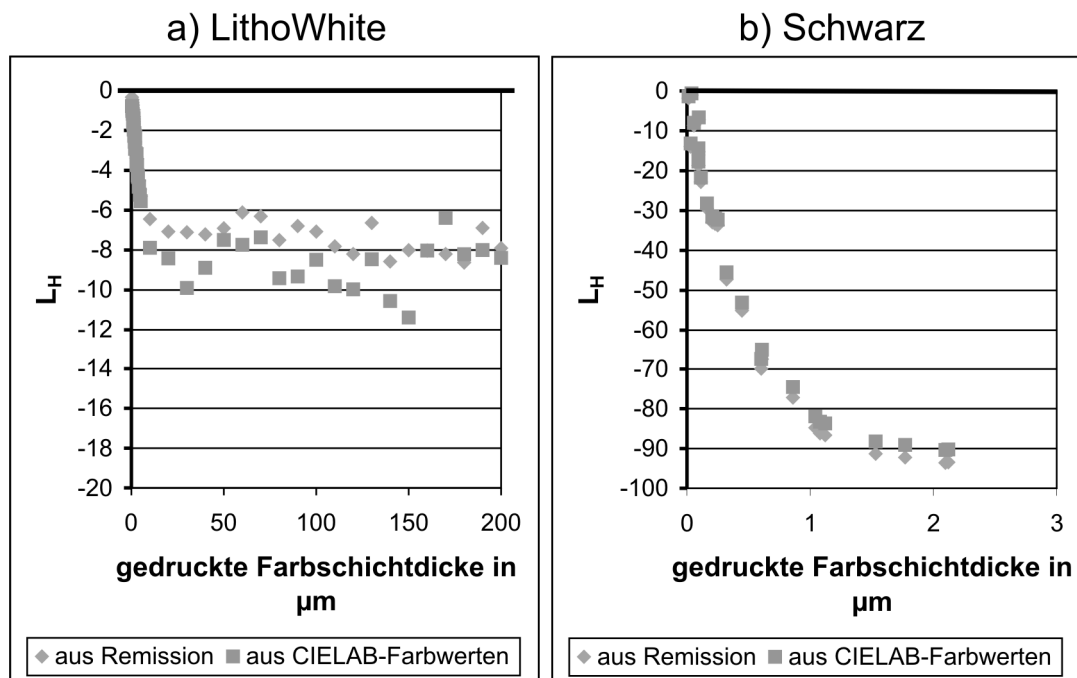


Abbildung 6-18: Gegenüberstellung der aus Remissionswerten und aus CIELAB-Farbwerten berechneten Größe  $L_H$ ; Druckfarben: a) LithoWhite, b) Schwarz; Messgerät: SpektroDens

Da sich im Vorfeld der Prozesskontrolle, abhängig von den zur Verfügung stehenden Messgeräten, immer für eine der beiden Berechnungsvorschriften entschieden werden muss, sind die festgestellten Abweichungen als unerheblich für die weitere Erarbeitung einer Berechnungsvorschrift zu werten. Zur Ableitung des mathematischen Modells wird das aus der Statistik bekannte Hilfsmittel der Regressionsanalyse angewendet [BLE04]. Am Beispiel der Druckfarbe Schwarz wird die Vorgehensweise beschrieben. Anschließend wird anhand der Druckfarbe LithoWhite auf Besonderheiten von Interferenzeffektfarben eingegangen.

Die über der gedruckten Farbschichtdicke aufgetragenen Ergebnisse der Messgröße  $L_H$  zeigen ein degressives Verhalten, welches für gedruckte Farbschichtdicken gegen einen Grenzwert strebt (Abbildung 6-18 b). Das Verhalten der Kurve nimmt die Form einer Abklingfunktion (Abbildung 6-19) an, die allgemein durch Gl. (6.10) beschrieben werden kann.

$$y(x) = a \cdot e^{\left(\frac{-1}{t}\right)x} + b \quad (6.10)$$

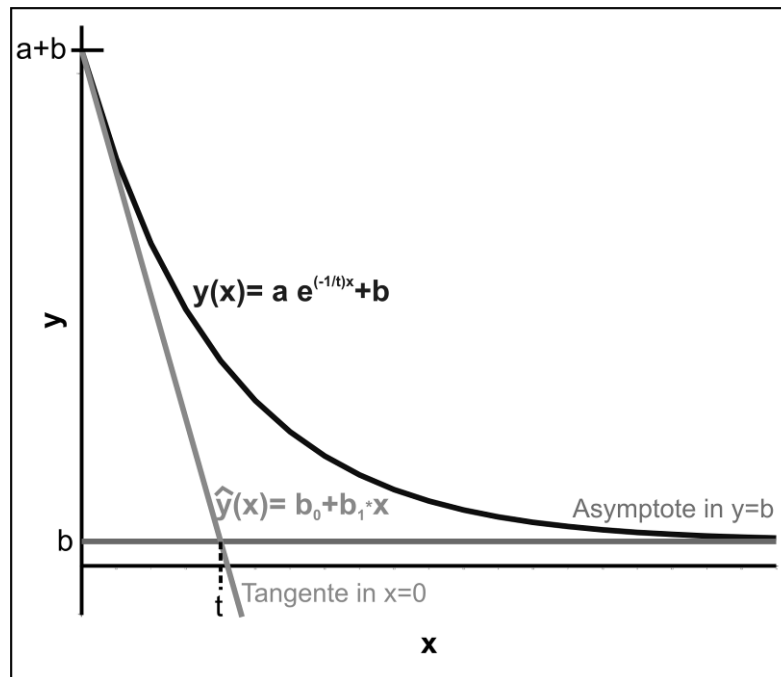


Abbildung 6-19: Allgemeine Beschreibung einer Abklingfunktion

Die in der Gl. angegebene Asymptote lässt sich für die Messergebnisse über den Grenzwert  $L_{H, \text{grenz}}$  bestimmen. Die Bestimmung der Tangente in  $x = 0$  basiert auf der Erkenntnis, dass sich für kleine gedruckte Farbschichtdicken ( $0 < s_{\text{Schwarz}} < 0,5 \mu\text{m}$ ) ein nahezu lineares Verhalten zwischen der gedruckten Farbschichtdicke und der Größe  $L_H$  ergibt. Dieses Verhalten lässt sich durch die Bestimmung einer Regressionsgeraden beschreiben (Gl. (6.11) und Abbildung 6-20). Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der zuvor ermittelten Asymptote bestimmt die Steigung des exponentiellen Verlaufs, siehe Abbildung 6-19.

$$\hat{y}(x) = b_0 + b_1 \cdot x$$

$$\text{mit: } b_1 = \frac{Q_{xy}}{Q_{xx}} = \frac{\sum (x_i - x_m) \cdot (y_i - y_m)}{\sum (x_i - x_m)^2}$$

$$b_0 = y_m - b_1 \cdot x_m \quad (6.11)$$

$y_m$ : Mittelwert der Messwerte für  $L_H$

für den Farbschichtdickenbereich  $s < 0,5 \mu\text{m}$

$x_m$ : Mittelwert der gedruckten Farbschichtdicke

für den Farbschichtdickenbereich  $s < 0,5 \mu\text{m}$

Für die Messergebnisse der Druckfarbe Schwarz unter Verwendung des Messgerätes von Techkon (Spektrodens) ergeben sich der in Abbildung 6-20

dargestellte Grenzwert  $L_{H,grenz} = -93$  sowie die GeradenGl. (6.12), die mit einem Bestimmtheitsmaß von 81% und einem Korrelationskoeffizienten von  $r = -0,9$  ermittelt wurden.

$$\hat{y}(x) = -5,4 - 136 \cdot x \quad (6.12)$$

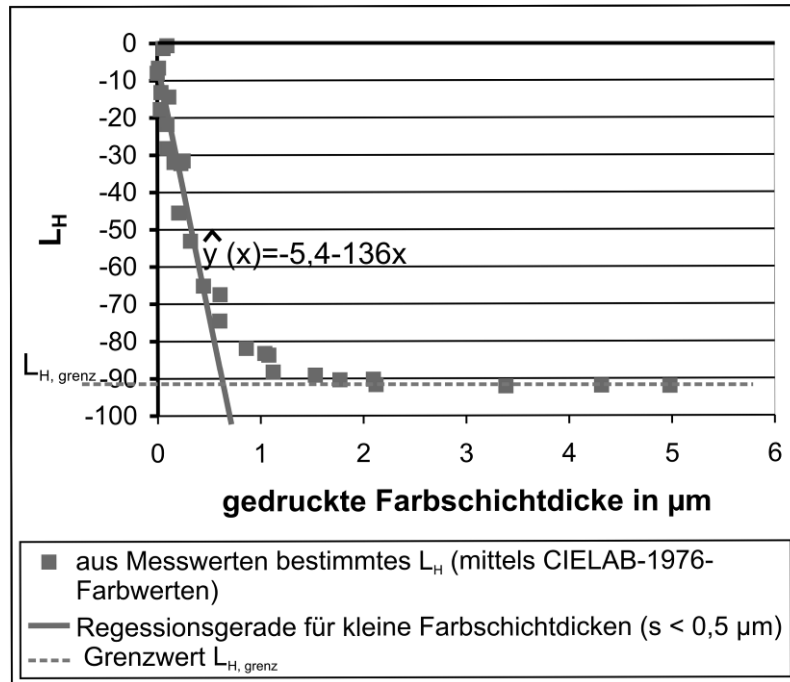


Abbildung 6-20: Herleitung der mathematischen Beschreibungsform des Zusammenhangs zwischen  $L_H$  und der gedruckten Farbschichtdicke; Druckfarbe Schwarz; Messgerät: SpektroDens

Aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Asymptote lässt sich die Steigung  $t$  zu  $t = 0,7$  ermitteln. Insgesamt ergibt sich daraus das in Abbildung 6-21 gezeigte und nach Gl. (6.13) beschreibbare Verhalten.

$$y(x) = L_{H,grenz} \cdot \left( e^{\frac{-1}{t}x_i} - 1 \right) = -93 \left( 1 - e^{\frac{-1}{0,7}x_i} \right) \quad (6.13)$$

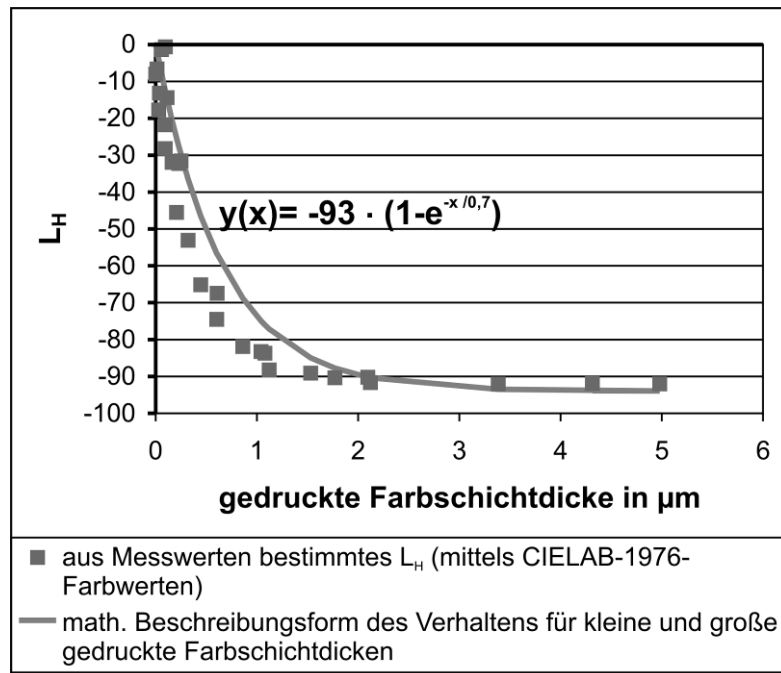


Abbildung 6-21: Gegenüberstellung der aus den Messergebnissen bestimmten Größe  $L_H$  und ihrer mathematischen Beschreibungsfunktion; Druckfarbe: Schwarz; Messgerät: SpektroDens

Generell zeigt diese Beschreibungsform unter Variation ihrer Parameter ebenso Gültigkeit für Interferenzeffektfarben. Auch hier kann das Streben nach einem Grenzwert, der eine Sättigung beschreibt, festgestellt werden. Im Gegensatz zu der Absorptionsdruckfarbe Schwarz stellt sich dieser Grenzwert jedoch erst für sehr große Farbschichtdicken ( $s > 30 \mu\text{m}$ ) ein (Abbildung 6-22). Da diese Farbschichtdicken nicht mehr durch das Bedruckbarkeitsgerät übertragen werden können, ist hier die Verwendung eines Stufenspaltrakels notwendig. Aufgrund des ungenauen Prozesses des Farbauftrags über ein Stufenspaltrakel kommt es zu großen Schwankungen der Messwerte. Für die Bestimmung des Grenzwertes  $L_{H,\text{grenz}}$  wird daher im Falle der Interferenzeffektfarben auf den Mittelwert für  $L_H$  im sehr großen Farbschichtdickenbereich zurückgegriffen. Dieser ergibt sich für die Interferenzeffektfarbe LithoWhite für die Messwerte des Techkon Spektralfotometers (SpektroDens) zu  $L_{H,\text{grenz}} = -6,9$ , siehe Abbildung 6-22.

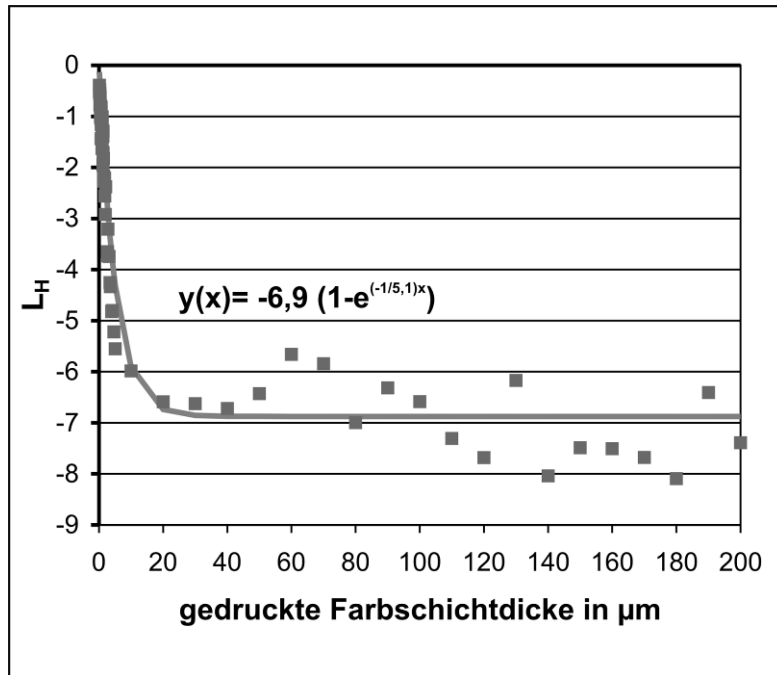


Abbildung 6-22: Gegenüberstellung der aus den Messergebnissen bestimmten Größe  $L_H$  und ihrer mathematischen Beschreibungsfunktion; Druckfarbe: LithoWhite; Messgerät: SpektroDens

Für beide Farben muss im Folgenden die Genauigkeit der Approximation der Messwerte durch die Funktion abgeschätzt werden. Dies wird anhand der in Abbildung 6-23 dargestellten prozentualen Abweichung zwischen messtechnisch ermitteltem und approximiertem Wert für eine gedruckte Farbschichtdicke erfolgen. Für die Druckfarbe Schwarz ergibt sich insbesondere im gedruckten Farbschichtdickenbereich zwischen  $0,6 \mu\text{m}$  und  $1,5 \mu\text{m}$  eine Abweichung von ca. 20 %. Für die Druckfarbe LithoWhite ergibt sich bis zu einer gedruckten Farbschichtdicke von  $2,5 \mu\text{m}$  eine deutlich kleinere Abweichung von unter 10 % zwischen Approximation und den gemessenen Werten für  $L_H$ . Bei dieser Druckfarbe ergeben sich größere Abweichungen ( $\approx 17 \%$ ) erst für größere Farbschichtdicken.

Das gleiche Bild zeigt sich auch für die anderen untersuchten Absorptions- (Magenta) und Interferenzeffektdruckfarben (LithoRed und LithoBlue). Im Gegensatz zur Absorptionsdruckfarbe Schwarz kann für Magenta eine Approximation mit einer Abweichung kleiner 10% über den gesamten im Druck typischen Farbschichtdickenbereich erreicht werden. Für die Interferenzeffektdruckfarben LithoRed und LithoBlue werden ähnliche Ergebnisse wie für LithoWhite erreicht. Auch hier ergibt sich eine Abweichung

zwischen der Approximation und den Messwerten von kleiner 10 % für den im Druck üblichen Farbschichtdickenbereich.

Insgesamt ergibt sich eine gute Abbildung des Verhaltens durch die oben vorgeschlagene Approximation mittels einer Abklingfunktion. Um eine bessere Approximation, insbesondere für die Absorptionsdruckfarbe Schwarz zu erreichen, könnten weitere mathematische Verfahren Anwendung finden. Jedoch ist der damit verbundene Aufwand und der Nutzen gegeneinander abzuwägen.

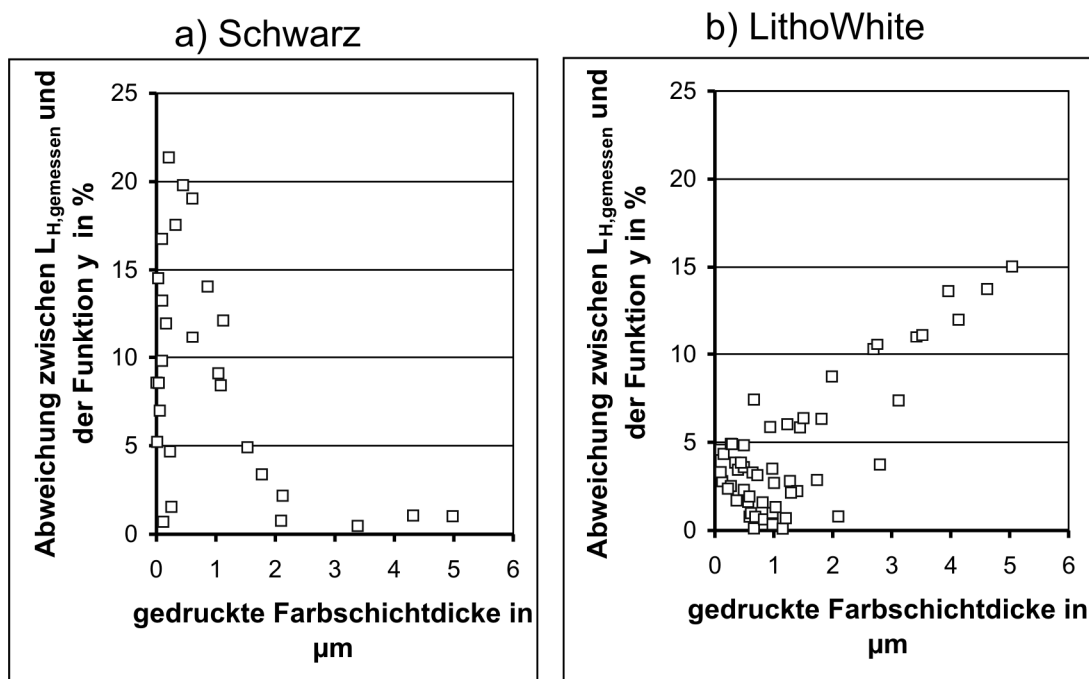


Abbildung 6-23: Prozentuale Abweichung zwischen messtechnisch ermitteltem und durch die Funktion  $y$  approximiertem Wert der Größe  $L_H$  in Abhängigkeit der gedruckten Farbschichtdicke

Abbildung 6-24 zeigt eine Gegenüberstellung der aus den Messwerten der unterschiedlichen Messgeräte ermittelten mathematischen Beschreibungsfunktionen für die Druckfarbe LithoWhite. Es zeigt sich, dass das ermittelte Verhalten stark abhängig von dem zur Messung verwendeten Messgerät ist. Hieran zeigt sich die bereits in anderen Zusammenhängen untersuchte Thematik der großen Unterschiede zwischen den Messergebnissen unterschiedlicher Messgeräte. Für Druckproben des Offsetdrucks, bei einer Messung im Druckkontrollstreifen konnten beispielsweise durch die Fogra Abweichungen zwischen den Messergebnissen unterschiedlicher Messgeräte bis zu  $\Delta E_{\text{ab}}=1,2$  festgestellt werden [DOL05]. In Bezug auf Interferenzeffektfarben liegen derzeit

noch keine Erkenntnisse vor. Aufgrund der in Abbildung 6-24 ist jedoch von deutlich größeren Unterschieden zwischen den Messergebnissen unterschiedlicher Messgeräte zu erwarten. Die in [DOL05] gegebene Empfehlung, lediglich einen Vergleich der Messergebnisse eines Messgerätes vorzunehmen, wird in Bezug auf die Betrachtung von Interferenzeffektfarben übernommen.

Es kann gezeigt werden, dass die sich ergebende Beschreibungsfunktion stark von der gedruckten Druckfarbe abhängig ist. Für Absorptionsfarben ist ein deutlich ausgeprägter Verlauf mit einem sich schon bei mittleren gedruckten Farbschichtdicken einstellenden Grenzwert  $L_{H,grenz}$  festzustellen (Abbildung 6-25 a)). Auch hier unterscheidet sich die Absorptionsfarbe Magenta mit einem Grenzwert von  $L_{H,grenz} \approx -52$  von dem Verlauf der Absorptionsfarbe Schwarz mit einem Grenzwert von  $L_{H,grenz} \approx -93$  deutlich. Ein ebensolches Verhalten ist zwischen den unterschiedlichen gedruckten Interferenzeffektfarben festzustellen (Abbildung 6-25 b). Hier zeigt sich für die Druckfarbe LithoWhite die kleinste Veränderung ( $L_{H,grenz} \approx -7$ ) für LithoBlue die zweitkleinste ( $L_{H,grenz} \approx -10,5$ ) und für LithoRed die größte Veränderung ( $L_{H,grenz} \approx -12,5$ ).

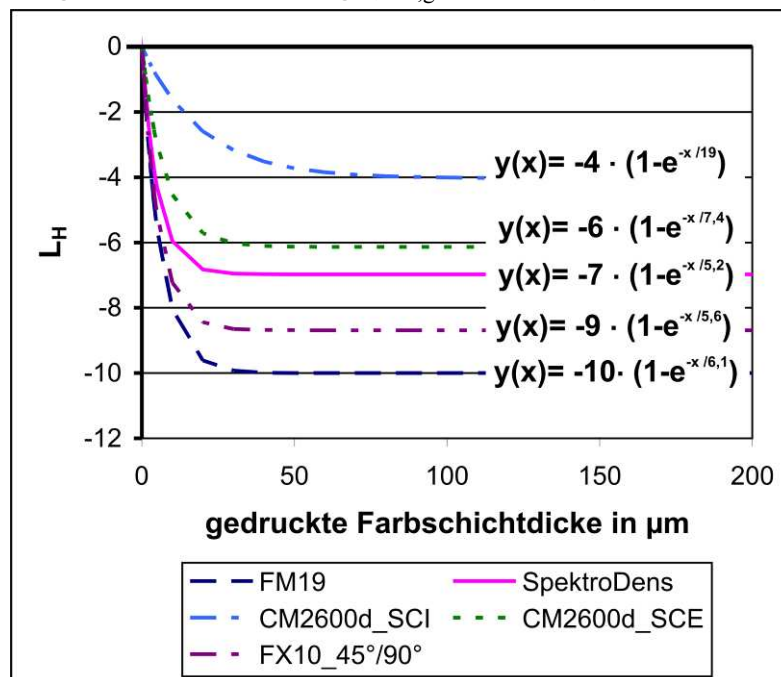


Abbildung 6-24: Gegenüberstellung der mathematischen Beschreibungsfunktionen für die unterschiedlichen Messgeräte (FM19, SpektroDens, CM2600d\_SCI, CM2600d\_SCE und FX10\_45°/90°); Druckfarbe: LithoWhite



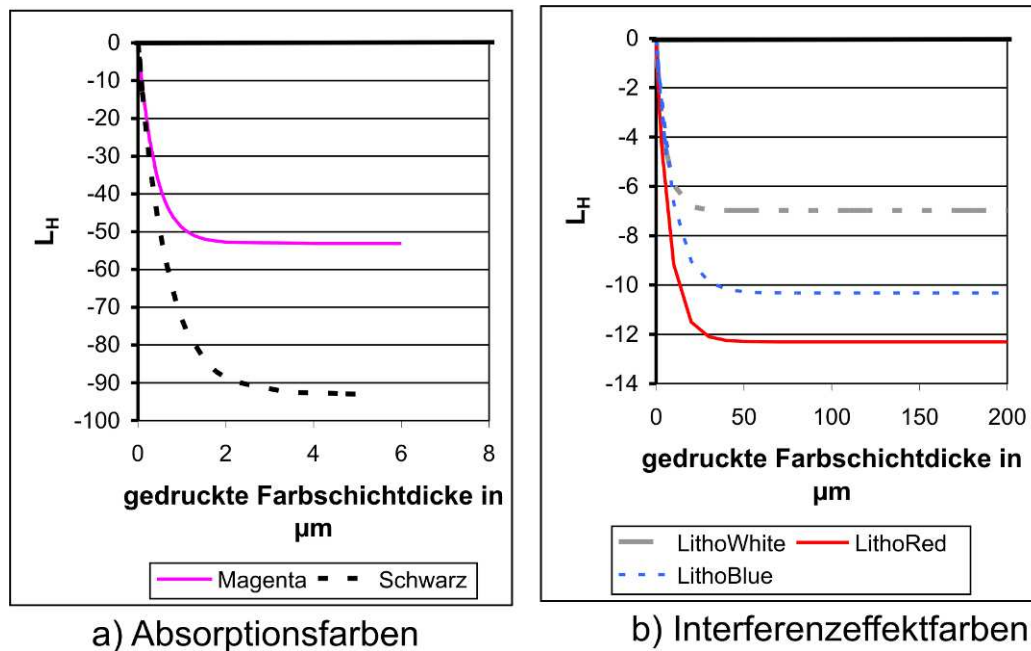


Abbildung 6-25: Gegenüberstellung der Veränderungen in der Beschreibungsfunktion für unterschiedliche Druckfarben: a) Absorptionsfarben (Magenta und Schwarz), b) Interferenzeffektfarben (LithoWhite, LithoRed und LithoBlue); Messgerät: SpektroDens

Insgesamt ergibt sich somit eine deutliche Abhängigkeit von dem gewählten Messgerät und der Druckfarbe, die vor Beginn der Messung jeweils festgestellt werden muss. Hierzu wird folgende allgemeine Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Zur Ermittlung des Verhaltens für kleine und mittlere Farbschichtdicken sollten mindestens drei bis vier Druckproben unterschiedlicher Farbschichtdicke im Bereich von 0,2  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  mittels eines Probedruckgerätes oder einer Druckmaschine erstellt werden.
- Des Weiteren ist mindestens eine Druckprobe mit einer sehr hohen Farbschichtdicke anzufertigen. Hierzu kann mit einer Spachtel Druckfarbe auf den Bedruckstoff aufgebracht werden.
- Mittels der mit einem Messgerät ermittelten Messwerte für die erstellten Druckproben und den unbedruckten Bedruckstoff lassen sich die Größe  $L_H$  und der Grenzwert  $L_{H,\text{grenz}}$  errechnen.
- Aus den Werten der Größe  $L_H$  für die Druckproben kleiner bis mittlerer Farbschichtdicke ( $s \approx 0,2 \mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$ ) lässt sich die Regressionsgerade und aus ihr die Steigung  $t$  berechnen.
- Für die anschließende Prozesskontrolle lässt sich mittels der zuvor ermittelten Kennlinie, ähnlich wie mit der in der Druckindustrie

bekannten Kenngröße der Dichte arbeiten und der Prozess kontrollieren, steuern und regeln.

Für Interferenzeffektfarben lässt sich aufgrund des nahezu linearen Verhaltens der Messgröße  $L_H$  im kleinen bis mittleren Farbschichtdickenbereich ( $s < 5 \mu\text{m}$ ) ein vereinfachtes Verfahren anwenden:

- Anfertigung von drei bis vier Druckproben mit unterschiedlichen gedruckten Farbschichtdicken zwischen  $0,5 \mu\text{m}$  und  $5 \mu\text{m}$ .
- Messung des unbedruckten Bedruckstoffs und der Druckproben, woraus der Verlauf der Messgröße  $L_H$  festgestellt werden kann.
- Ermittlung der Regressionsgeraden und Verwendung ihres Verlaufs als Kennlinie zur Prozesskontrolle im kleinen bis mittleren Farbschichtdickenbereich.

#### 6.3.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bedruckstoffe

Die ermittelten Zusammenhänge konnten bisher lediglich für den Bedruckstoff Phoenix Imperial APCO II/II festgestellt werden. Dieses Kapitel dient zur Klärung der Frage bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bedruckstoffe. An dieser Stelle erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der Druckfarbe LithoRed für das Messgerät Spektrodens. Die hieraus resultierenden Erkenntnisse lassen sich auf die anderen Interferenzeffektfarben und Messgeräte übertragen. Der Fokus liegt hierbei auf der Betrachtung der vereinfachten Beschreibungsform durch die Regressionsgerade. Als Bedruckstoffe wurden für die Überprüfung der Anwendbarkeit der Messgröße  $L_H$  ein Naturpapier, ein Zeitungspapier und ein glänzend gestrichenes Kunstdruckpapier gewählt.

Die Oberfläche des Naturpapiers ist gegenüber der Oberfläche des Zeitungspapiers und des gestrichenen Kunstdruckpapiers rau. Dies spiegelt sich in den Messergebnissen (Abbildung 6-26 c)) wieder. Für das Naturpapier ergeben sich im kleinen Farbschichtdickenbereich sehr große Schwankungen. Hier kann daher auch nur eine ungenügende Approximation mittels der Regressionsgerade erreicht werden, was sich auch im Bestimmtheitsmaß  $B = 66 \%$  ausdrückt. Beim Zeitungspapier (Abbildung 6-26 d)) zeigt sich im kleinen Farbschichtdickenbereich ( $s < 2 \mu\text{m}$ ) im Gegensatz zu den anderen betrachteten Bedruckstoffen eine Aufhellung gegenüber dem Bedruckstoff, welches sich an einem positiven  $L_H$ -Wert widerspiegelt. Insgesamt ergibt sich auch beim Zeitungsdruckpapier mit größer werdender gedruckter

Farbschichtdicke ein abnehmender Verlauf. Dieser lässt sich ausreichend gut durch die Regressionsgerade abbilden, was sich am Bestimmtheitsmaß  $B = 82\%$  ausdrückt. Das einheitlichste Verhalten zeigen die Ergebnisse der Druckproben auf gestrichenem Kunstdruckpapier (Abbildung 6-26 b). Lediglich im sehr kleinen Farbschichtdickenbereich ( $s < 0,5\ \mu\text{m}$ ) zeigen sich stark streuende Messergebnisse für die Größe  $L_H$ . Im drucküblichen Farbschichtdickenbereich können die Messergebnisse gut durch die Approximation der Regressionsgeraden ( $B = 85\%$ ) abgebildet werden.

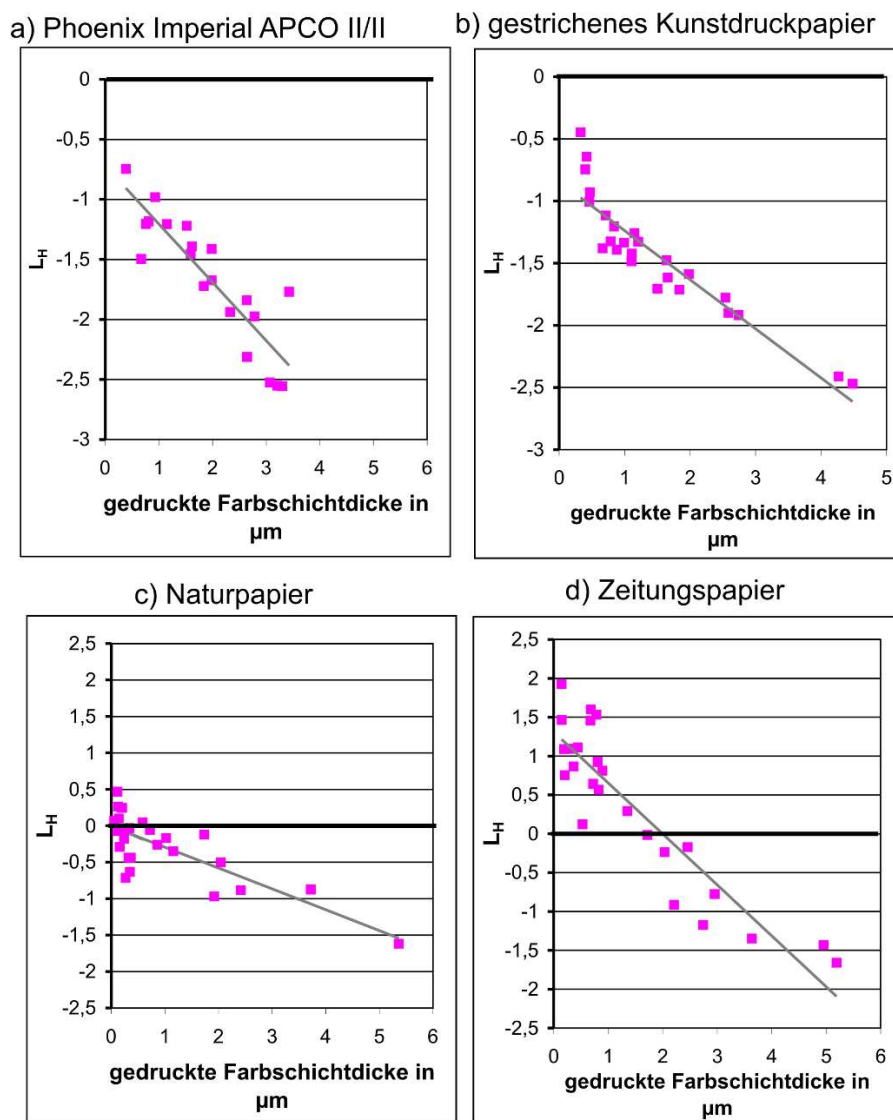


Abbildung 6-26: Darstellung der Ergebnisse der Größe  $L_H$  für die Interferenzeffektfarbe LithoRed und der Approximation durch eine Regressionsgerade für vier unterschiedliche Bedruckstoffe, a) Phoenix Imperial APCO II/II, b) gestrichenes Kunstdruckpapier, c) Naturpapier und d) Zeitungspapier; Messgerät: SpektroDens

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die oben angegebene Arbeitsweise sich auch auf andere Bedruckstoffe übertragen lässt. Problematisch stellt sich hierbei lediglich das Naturpapier dar. Aufgrund der sehr rauen Oberfläche und der hohen Saugfähigkeit des Bedruckstoffs ergeben sich große Schwankungen bezüglich der Messergebnisse. Aufgrund dessen ist hier eine Approximation nicht in ausreichendem Maße möglich. Im Gegensatz zu der Erwartung ergeben sich gute Ergebnisse für das Zeitungsdruckpapier. Trotz der minderen Qualität dieses Bedruckstoff lässt sich ein eindeutiges Verhalten feststellen, welches sich ausreichend gut durch die Regressionsgerade approximieren lässt. Die besten Ergebnisse bezüglich der Approximation lassen sich für gestrichene Bedruckstoffe mit einer glatten Oberfläche erzielen.

Es konnte somit gezeigt werden, dass die neue Messgröße  $L_H$  für alle Bedruckstoffe und Druckfarben einsetzbar ist. Sie ist somit als universelle Messgröße zur Prozesskontrolle anwendbar. Die oben beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Messgröße  $L_H$  wurde im Rahmen dieser Arbeit als Patentantrag [HUP07e] eingereicht.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

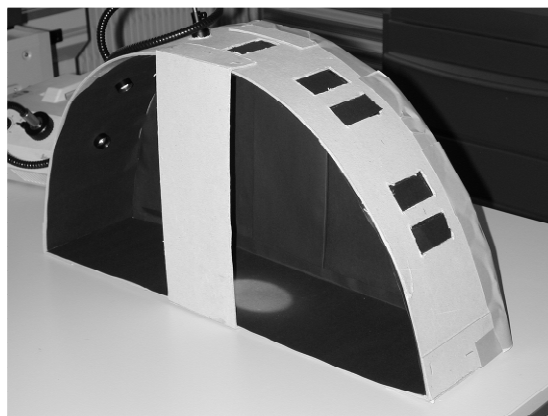
Die Forderung der Druckindustrie nach einer Automatisierung der Druckprozesse bei gleichzeitig zunehmendem Einsatz von Veredelungstechniken und steigenden Qualitätsansprüchen macht die Weiter- und Neuentwicklung von Mess- und Regelungsprozessen notwendig. Diese Arbeit leistet im Hinblick auf die Automatisierung der Prozess- und Qualitätskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben diesbezüglich einen Beitrag.

In einer Literaturübersicht wurde ein Grundlagenverständnis für den Druckprozess und die damit verbundenen Regelstrategien vermittelt. Darüber hinaus erfolgte eine Darstellung des den Interferenzeffekten zugrundeliegenden physikalischen Effektes und die damit verbundenen Herausforderungen an die Farbmesstechnik. Durch die Darstellung der experimentellen Analyse, in welcher auf die Festlegung der Versuchsparameter zur Erstellung der Druckproben sowie auf die durchgeführten Farb- und Dichtemessungen eingegangen wird, erfolgt ein Brückenschlag zur Auswertung der durch die Druckproben gewonnenen Erkenntnisse. Hierbei erfolgt einerseits eine eingehende Betrachtung der Messergebnisse des Mehrwinkelspektrofotometers FX10 hinsichtlich der Qualitätskontrolle (Kapitel 5). Andererseits wird gezielt auf die Möglichkeiten zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben eingegangen (Kapitel 6). Neben der Betrachtung der Ergebnisse der experimentellen Analyse wurden sowohl für die Prozess- als auch die Qualitätskontrolle Modelle auf Basis theoretischer Grundlagen entwickelt.

Als erstes Ergebnis dieser Arbeit ist die Ableitung notwendiger Messgeometrien und die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Farbwirkung gedruckter Interferenzeffektfarben zu nennen. So konnte gezeigt werden, dass für gedruckte Interferenzeffektfarben der ersten Generation zwei Messgeometrien zur Identifizierung ihrer Farbwirkung ausreichen. Dieses Erkenntnis konnte auf Basis eines Modells bestätigt und auf den Flexodruck erweitert werden. Als Messgeometrien wurden die heute in der Druckindustrie etablierte  $45^\circ/0^\circ$ - bzw.  $0^\circ/45^\circ$ -Messgeometrie und eine weitere Messgeometrie mit einer Beobachtungsrichtung nahe des Glanzwinkels vorgeschlagen. Zur Erleichterung der Umsetzung in heute üblichen Messgeräten wird der zusätzliche Einsatz der  $45^\circ/-30^\circ$  (as15)-Messgeometrie favorisiert. Hierdurch ist es möglich mit nur einer Beleuchtungsquelle unter zusätzlichem Einsatz eines zweiten Sensors, die Farbwirkung gedruckter Interferenzeffektfarben mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben.

Als zweites Ergebnis geht aus dieser Arbeit eine neue Messgröße zur Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben hervor. Auf Basis der Ermittlung der Helligkeitsdifferenz  $L_H$  zwischen unbedrucktem Bedruckstoff und bedruckter Probe lässt sich eine allgemeingültige Berechnungsvorschrift angeben. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich für im offsetdrucktypischen Farbschichtdickenbereich gedruckte Interferenzeffektfarben ein linearer Zusammenhang zwischen der neuen Messgröße  $L_H$  und der gedruckten Farbschichtdicke ergibt.

In Hinblick auf weiterführende Arbeiten zur Thematik gedruckter Interferenzeffektfarbe ist insbesondere auf die Standardisierung der visuellen Abmusterung hinzuweisen. So wird heute immer noch auf eine visuelle Abmusterung durch unkontrollierte Kippbewegungen zurückgegriffen [CRA01a] und [CRA06]. Um diesen Missstand zu beseitigen, wurde am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technische Universität Darmstadt mit der Gestaltung eines einfachen, leicht zu bedienenden und kostengünstigen Modells einer Abmusterungskabine für Interferenzeffektfarben begonnen. Ein erstes Modell (Abbildung 7-1), sowie erste Abmusterungsversuche wurden im Zuge einer Studienarbeit bereits erstellt [BET08]. Für weitere Forschungsaktivitäten bieten sie die Basis, um einen Vergleich zwischen den messtechnisch ermittelten und visuell sichtbaren Zusammenhängen von gedruckter Farbschichtdicke und der hiermit erzielten Farbwirkung vornehmen zu können.



*Abbildung 7-1: Konzeptmodell zur standardisierten visuellen Abmusterung von Interferenzeffektfarben [BET08]*

Weitere Forschungsaktivitäten bezüglich gedruckter Interferenzeffektfarben sind in der Weiterentwicklung und Anpassung des entwickelten Modells zur Beschreibung der Farbwirkung gedruckter Interferenzeffektfarben zu sehen. Diesbezüglich ist insbesondere auf die korrekte Erfassung der Veränderung der Farbwirkung bei variablem Differenzwinkel zum Glanzwinkel einzugehen.

Die Berechnung und Bewertung der Farbwerte wurde in dieser Arbeit im CIELAB-Farbsystem vorgenommen. Neuere Farbsysteme, wie z. B. DIN99 und die Bewertung des Farbabstands nach CIEDE2000 erlauben insbesondere eine verbesserte Betrachtung von Farben nahe Unbunt. Da gedruckte Interferenzeffektfarben nur sehr kleine Farbeffekte zeigen, könnte eine Anwendung der Farbsysteme DIN99 bzw. die CIEDE2000 bessere Ergebnisse liefern. Die Überprüfung weiterer Farbsysteme wäre daher vorteilhaft.

Bezüglich der Anforderungen des Druckens ist ferner auf den Druck von Interferenzeffektfarben in Tonwertabstufungen einzugehen. In dieser Arbeit wurde der Fokus auf das Verhalten in Bezug auf die gedruckte Farbschichtdicke, nicht jedoch in Bezug auf eine mögliche Tonwertabstufung gelegt. Es ist zu vermuten, dass sich die Farbwirkung einer gedruckten Interferenzeffektfarbe mit festgehaltener gedruckter Farbschichtdicke und variablen Tonwerten in Abhängigkeit des bedeckten Flächeninhalts ähnlich wie bei einer Absenkung der gedruckten Farbschichtdicke verhält. Weitere Forschungsaktivitäten unter Einbeziehung einer experimentellen Analyse müssen zur Klärung der Annahme noch erfolgen.





## 8 Literaturverzeichnis

- [BAB90] Baba, Gorrow: *Gonio-Spectrophotometric Analysis of Pearl-Mica Paint*. In: *Die Farbe*, 37. Jahrgang 1990, S. 99 - 110
- [BÄU73a] Bäumer, Wilhelm: *Perlglanz und Perlglanzpigmente Teil 1*. In: *Farbe & Lack*, 79. Jahrgang, 1973, Nr. 6, S. 530 - 536
- [BÄU73b] Bäumer, Wilhelm: *Perlglanz und Perlglanzpigmente Teil 2*. In: *Farbe & Lack*, 79. Jahrgang, 1973, Nr. 7, S. 638 - 645
- [BÄU73c] Bäumer, Wilhelm: *Perlglanz und Perlglanzpigmente Teil 3*. In: *Farbe & Lack*, 79. Jahrgang, 1973, Nr. 8, S. 747 - 755
- [BÄU96] Bäuerle, Tasso: *The determination of the color tolerances for metallic and pearlescent colors*. In: *Die Farbe*, 42. Jahrgang, 1996, Nr. 4 – 6, S. 145 - 150
- [BEL04] Belz, Harry et.al.: *Messen in Vorstufe und Druck – Farben, Dichten, Tonwerte*. Wiesbaden: bvdn 2004
- [BER00] Berns, Roy S.: *Principles of Color Technology*. Third Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [BER91] Berger-Schunn, Anni: *Praktische Farbmessung*. Göttingen: Muster-Schmidt, 1991
- [BER04] Bergmann; Schäfer: *Optik Wellen und Teilchenoptik*. 10. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter, 2004
- [BET08] Bettner, Carsten: *Aufbau eines Prüfstandes zur visuellen Abmusterung von Interferenzeffektfarben*. Studienarbeit an der TU-Darmstadt, 2008
- [BIL93] Billmeyer, Fred; Saltzman Max: *Grundlagen der Farbtechnologie*. 2. Auflage, Göttingen: Muster-Schmidt, 1993
- [BLE04] Bleymüller, Josef: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. 14. Auflage, München: Franz Vahlen, 2004
- [BÖH99] Böhm, Klaus: *Ein effektvolles Farbenspiel – Wie Perlglanzpigmente in Druckfarben für verschiedene Druckverfahren eingesetzt werden können*. In: *Farbe & Lack*, 105. Jahrgang, 1999, Nr. 10, S. 30 - 42

- [BRU07] System Brunner: Homepage zur Erläuterung des Systems Brunner. [www.systembrunner.com](http://www.systembrunner.com), Stand: 12.12.2007
- [BVD03] Bundesverband Druck und Medien: *ProzessStandard Offsetdruck*. Wiesbaden: bvdm, 2003
- [CRA92] Cramer, Werner: *Farbmessung an Glimmerpigmenten*. In: Technisches Messen, 59. Jahrgang, 1992, Nr. 5, S. 229 - 232
- [CRA00] Cramer, Werner: Magical Mixtures, <http://www.pcimag.com>  
Stand: 17.02.2006
- [CRA01a] Cramer, Werner; Gabel, P.W.: *Effektvolles messen*. In: Farbe & Lack, 107. Jahrgang, 2001, Nr. 1, S. 42 - 49
- [CRA01b] Cramer, Werner; Gabel, P.W.: *Measuring Special Effects*. In: Paint & Coatings Industry, 2001, Nr. 9, S. 36 - 43
- [CRA03a] Cramer, Werner: *Ohne Glimmer, aber mit Glitzer - Neue Effekte auf synthetischer Basis*. In: Farbe & Lack, 109. Jahrgang, 2003, Nr. 4, S. 132 - 136
- [CRA03b] Cramer, Werner; Gabel, P.W.: *Das gewisse Etwas –Dreiecksbeziehungen aus Bunt-, Aluminium- und Interferenzpigmenten*. In: Farbe & Lack, 109. Jahrgang, 2003, Nr. 10, S. 78 - 84
- [CRA03c] Cramer, Werner: *Warum der Umgang mit Interferenzpigmenten so schwierig erscheint*. [www.phaenomen-farbe.de](http://www.phaenomen-farbe.de), Rubrik: Archiv, Grundlagen, Pigmente, Stand: 17.02.2006
- [CRA06] Cramer, Werner: *Visuelle und instrumentelle Abmusterung von Interferenzpigmenten im Vergleich*. In: Farbe & Lack, 112. Jahrgang 2006, Nr. 9, S. 26 - 30
- [CZO00] Czornij, Zenon: *Hochwertige Eisenoxide als Pigmente in Fahrzeuglacken*. In: Farbe & Lack, 106. Jahrgang, 2000, Nr. 8, S. 38 - 43
- [DAT06] Datacolor: *Multi FX10 Bedienungsbandbuch*. 2006
- [DEM04] Demtröder: *Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik*. 3. Auflage, Berlin: Springer 2004
- [DFT99] DFTA: *Technik des Flexodrucks*. 4. Auflage, Coating, 1999
- [DFT06] DFTA: *Technik des Flexodrucks*. 5. Auflage, Coating 2006

- [DfwG07] Fachgespräche auf der Jahrestagung der deutschen Farbwissenschaftlichen Gesellschaft (DFWG) 2007 im Rahmen einer Führung durch das Fertigungswerk für Interferenzeffektpigmente
- [DOL05] Dolezalek, F., Kraushaar A.: *Korrektur von Messfehlern bei Farbmessgeräten*. Fogra-Forschungsbericht 52.034, München: Fogra 2004
- [DÖR93] Döring, Günter: *Correlation between Visually and Instrumentally Estimated Colour Differences of Metallics*. In: Die Farbe, 39. Jahrgang 1993, Nr. 1 – 6, S. 177 - 186
- [DÖR99] Döring, Günter: *Zur Kalibrierung von Gonio-Spektrometern*. In: Die Farbe, 45. Jahrgang 1999, Nr. 1 -3, S. 45 - 65
- [FOL94] Foley, James: *Grundlagen der Computergrafik*. Bonn: Addison-Wesley, 1994
- [GAB92] Gabel, Peter: *Farbmessung von Interferenzpigmenten*. In: Technische Messesen, 59. Jahrgang, 1992, Nr. 5, S. 226 - 228
- [GAB96] Gabel, Peter: *Gonichromatic Quality Control of Pear Pigments*. In: Die Farbe, 42. Jahrgang, 1996, Nr. 4 -6, S. 159 - 168
- [GER90] Gerlinger, Herrmann: *Color Measurement of Pearlescent Paints for the Nineties*. In: Die Farbe, 37. Jahrgang, 1990, S. 123 - 135
- [GLA96] Glausch, Ralf et.al.: *Perlglanzpigmente*. Hannover: Vincents, 1996
- [GOL93] Golphon, Roland: *Reproduktionsverfahren*. 7. Auflage, Frankfurt am Main: Polygraph, 1993
- [GÜN97] Günther et al.: *Produktion und Logistik*. 3. Auflage, Berlin: Springer, 1997
- [HEI05] Heidelberger Druckmaschinen AG: *Praxiswissen: Einführung in die Farbmatrik und Spektralfotometrie*. Heidelberg: Heidelberger Druckmaschinen AG, 2005
- [HEI06a] Heidelberger Druckmaschinen AG: *Fachwissen Farbe und Qualität*. Heidelberg: Heidelberger Druckmaschinen AG, 2006
- [HEI06b] Heidelberger Druckmaschinen AG: *Praxiswissen: Bedienleitfaden zu Prinect Axis Control*. Heidelberg: Heidelberger Druckmaschinen AG, 2006

- [HOF87] Hofmeister, Franz: *Koloristische Bewertung von Perlglanzpigmenten*. In: Farbe & Lack, 93. Jahrgang, 1987, Nr. 10, S. 799 - 802
- [HOF89] Hofmeister, Franz: *Remissionsmessungen von Interferenz-, Aluminium- und Körperfarbenpigmenten*. In: Farbe & Lack, 95. Jahrgang, 1989, Nr. 8, S. 557 - 560
- [HOF90] Hofmeister, Franz: *Einfluss einer variablen Messgeometrie auf die Farborte von Interferenzpigmenten*. In: Farbe & Lack, 96. Jahrgang, 1990, Nr. 10, S. 773 - 775
- [HOF92] Hofmeister, Franz: *Farbmetrische Charakterisierung und Identifizierung von Mica-Lackierungen*. In: Farbe & Lack, 98. Jahrgang, 1992, Nr. 8, S. 593 - 596
- [HUB06] Huber, Adalbert: *Effektpigmente in Lacken*,  
www.phaenomen-farbe.de, Rubrik: Archiv, Grundlagen, Pigmente,  
Stand: 12.02.2006
- [HUB07] Huber Druckfarben München: *Effektpigmente in Lacken – Technische Informationen: Perlglanzeffekte im Offsetdruck*.  
www.hubergroup.de, Stand: 23.04.2007
- [HUN88] Hunt, Dr. R. W. G.: *Measuring Colour*. Third Edition, Kingston-upon-Thames: Fountain Press, 1998.
- [HUP06] Hupp, Heike: *Measuring printed special-effect colours - First Experiences with the MultiFX10 spectrophotometer*. 33<sup>th</sup> Iarigai Conference 2006
- [HUP07a] Hupp, Heike; Dörsam Edgar: *Quality Control for Printed Interference Colours – Investigation for a Basic Measuring Geometry*. 34<sup>th</sup> Iarigai Conference 2007
- [HUP07b] Hupp, Heike; Dörsam Edgar: *Anforderungen der Druckindustrie an die Farbmesung von Perlglanz-/Interferenzeffektfarben*. DfwG-Jahrestagung 2007
- [IDD07] IDD, Dörsam: *Vorlesungsunterlagen zur Vorlesung „Farbwiedergabe in den Medien“*, Rubrik: Service für Studenten,  
Stand: 21.12.2007
- [KAM07] Kamleiter, Tobias: *Auswertung von im Flexodruck erstellten Bedruckbarkeitsproben*. Darmstadt, Studienarbeit an der TU-Darmstadt, 2007

- [KIP00] Kipphan, H.: *Handbuch der Printmedien*. Heidelberg: Springer, 2000
- [KLE03] Kleppmann, Wilhelm: *Taschenbuch der Versuchsplanung*. München: Carl Hanser, 2003
- [KLE04] Klein, Georg A.: *Farbenphysik für industrielle Anwendungen*. Berlin: Springer 2004
- [KNO06] Knoth, Markus: *Zur Realstruktur von Perlglanzpigmenten*. Aachen: Shaker, 2006
- [LAN95] Lang, Heinwig: *Farbwiedergabe in den Medien*. Göttingen: Muster-Schmidt, 1995
- [LOO89] Loos, Hansl: *Farbmessung. Naturkundliche Grundlagen der Druckindustrie* Band 4, Itzehoe: Beruf + Schule, 1989
- [MAI91] Maisch, Roman; Weigand, Manfred: *Perlglanzpigmente*. Bibliothek der Technik, Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1991
- [MAN04] Manning, Jorg, Verderber, Ray: *Improving Metallic Ink Printing through Polarized Densitometry*. In: Ink World, Vol. 10, No. 1, 2004, S. 59 - 63
- [MER07a] Merck: *Effektpigmente für die Druckindustrie – Vom Design zum Druck*. Darmstadt: Merck, 2007
- [MER07b] Merck: *Effect Pigments Farbkarten für unterschiedliche konventionelle Druckverfahren*. Darmstadt, Merck, 2007
- [MEY98] Meyer, Frank: *Farbe ohne Farbstoff*. In: Farbe & Lack, 104. Jahrgang, 1998, Nr. 8, S. 28 - 31
- [MEY07] Meyers Lexikon Online. <http://lexikon.meyers.de>  
Stand: 15.12.2007
- [MRO99] Mronga, Norbert: *Wenn Farben „floppen“ (Mehrschichtige Pigmente mit buntem Farbenspiel)*. [www.phaenomen-farbe.de](http://www.phaenomen-farbe.de), Rubrik: Archiv, Grundlagen, Pigmente, Stand: 17.02.2006
- [OLS04] Olschewski, Fred: *Neue Farbmessstechnik zur Qualitätssicherung von Effektoberflächen*. DfwG-Jahrestagung 2004
- [OTT82] Ottersbach, Jochem: *Bedruckstoff und Farbe*. 3. Auflage, Itzehoe: Beruf + Schule, 1995

- [PAU00] Paul, Andreas: *Farben messen – anschaulich erklärt*. FOGRA Praxis Report 53, München: FOGRA, 2000
- [PED02] Pedrotti, F. et.al.: *Optik für Ingenieure*. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2002
- [PFA97] Pfaff, Gerhard: *Perlglanzpigmente – Der Chemiker als Designer von Farbe und Glanz*. In: Chemie in unserer Zeit, 31. Jahrgang, 1997, Nr. 1, S. 6-16
- [PFA02] Pfaff, Gerhard: *Special Effect Pigments*. In: High Performance Pigments, Edited by Hugh M. Smith, Weinheim: Wiley-VCH, 2002
- [PFA06] Pfaff, Gerhard: *Anorganische Pigmente – Aktueller Stand und neue Entwicklungen*. [www.phaenomen-farbe.de](http://www.phaenomen-farbe.de), Rubrik: Archiv, Grundlagen, Pigmente, Stand: 17.02.2006
- [PFA07a] Pfaff, Gerhard: *Spezielle Effektpigmente*. 2. Auflage, Hannover: Vincentz, 2007
- [PFA07b] Pfaff, Gerhard: *Anorganische Pigmente*. Vorlesung Sommersemester 2007
- [PHO75] Phong, Bui Tuong: *Illumination for Computer Generated Pictures*. In: Communication ACM, 18. Jahrgang 1975, Nr. 6, S. 311-317
- [POH63] Pohl: *Optik und Atomphysik*. 11. Auflage, Berlin: Springer 1963
- [RIC81] Richter, Manfred: *Einführung in die Farbmeterik*. 2. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter, 1981.
- [RIE89] Riedl, Rudi: *Technologie des Offsetdrucks*. 1. Auflage, Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1989
- [RÖM98] Römpf: *Lexikon Lacke und Druckfarben*. Stuttgart: Thieme, 1998
- [ROD90] Rodrigues, Allan: *Measurement of Metallic and Pearlescent Colors*. In: Die Farbe, 37. Jahrgang, 1990, S. 65 - 78
- [ROD96] Rodrigues, Allan: *ASTM E-12.12: Measurement of Metallic and Pearlescent Colors*. In: Die Farbe, 42. Jahrgang, 1996, S. 151 - 158
- [RÖS90] Rösler, Gerhard: *Multigeometry - Color Measurement of Effect Surfaces*. In: Die Farbe, 37. Jahrgang, 1990, S. 111 - 121

- [RÖS05] Rösler, Gerhard: *Multigeometrie - Farbmessung von Interferenzpigmenten*. DfwG-Jahrestagung 2005
- [SCH98] Schmid, Raimund, et.al.: *Optisch variable Glanzpigmente*. In: *Farbe & Lack*, 104. Jahrgang, 1998, Nr. 5, S. 44 - 48
- [SCH02a] Schläpfer, Kurt, (UGRA): *Farbmetrik in der grafischen Industrie*. St. Gallen: 2002
- [SCH02b] Schröder, Gottfried; Treiber Hanskarl: *Technische Optik*. 9. Auflage, Würzburg: Vogel, 2002
- [SCH07] Schmitt, Jörg Hrsg.: *UV Offsetdruck*. Heidelberg: Hürthig, 2007
- [TEC06] Techkon: *Densitometrie*. Broschüre [www.techkon.de](http://www.techkon.de), Stand: 23.11.2006
- [TES03] Teschner, Helmut: *Druck & Medien Technik*. 11. Auflage, Fellbach: Fachschriften-Verlag, 2003
- [TES97] Teschner, Helmut: *Offsetdrucktechnik*. 10. Auflage, Fellbach: Fachschriften-Verlag, 1997
- [TOL64] Tollenaar, D.; Ernst P. A. H.: *Optical density and ink layer thickness*. In: IGT Werkzaamheden en Publikaties, Stichting Instituut voor grafische Techniek tno Amsterdam, 1964
- [VÖL01] Völz, Hans: *Industrielle Farbprüfung*. 2. Auflage, Weinheim: Wiley-VCH, 2001
- [WIR07] Wirtschaftslexikon Online. [www.wirtschaftslexikon24.net](http://www.wirtschaftslexikon24.net), Stand: 15.12.2007
- [WYS00] Wyszecki Günter, Stiles W.S.: *Color Science*. 2. Auflage, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000

**Normen:**

- [ASMT WK 1164] ASTM WK 1164: *Standard Practice for Multiangle Color Measurement of Interference Pigments*. Revision 16.0, July 2006
- [CIE 15:2004] CIE Publ. No. 15:2004: *Colorimetry*. 3rd Edition, CIE 2004
- [CIE 17.4] CIE Publ. No. 17.4, 50(845): *Internationales Wörterbuch der Lichttechnik*., CIE 1987

- [DIN 16519] DIN 16519: *Prüfung von Drucken und Druckfarben des graphischen Gewerbes - Herstellung von Norm-Druckproben*. Juni 1967
- [DIN 16519-2] DIN 16519 – Teil 2: *Prüfung von Drucken und Druckfarben - Herstellung von Norm-Druckproben für optische Messungen*. August 1985
- [DIN 16536-1] DIN 16536-Teil 1: *Farbdichtemessung an Drucken Teil 1: Begriffe und Durchführung der Messung*. Mai 1997
- [DIN ISO 13655] DIN ISO 13655: *Spektrale Messung und farbmétrische Berechnung für graphische Objekte*. Februar 2000
- [DIN 4512-7] DIN 4512 –Teil 7: *Photographische Sensitometrie Bestimmung der optischen Dichte - Begriffe, Symbole und Kennzeichnungen*. Januar 1993
- [DIN 4512-8] DIN 4512 –Teil 8: *Photographische Sensitometrie Bestimmung der optischen Dichte - Geometrische Bedingungen für Messungen bei Transmission*. Januar 1993
- [DIN 4512-9] DIN 4512 –Teil 9: *Photographische Sensitometrie Bestimmung der optischen Dichte - Spektrale Bedingungen*. Januar 1993
- [DIN 4512-10] DIN 4512 –Teil 10: *Photographische Sensitometrie Bestimmung der optischen Dichte Geometrische Bedingungen für Messungen bei Reflexion*. Januar 1993
- [DIN 5033-1] DIN 5033 – Blatt 1: *Farbmessung Begriffe der Farbmétrik*. Juli 1970
- [DIN 5033-2] DIN 5033 – Blatt 2: *Farbmessung Normvalenz-Systeme*. April 1972
- [DIN 5033-3] DIN 5033 – Blatt 3: *Farbmessung Farbmaßzahlen*. Dezember 1978
- [DIN 5033-4] DIN 5033 – Blatt 4: *Farbmessung Spektralverfahren*. Mai 1964
- [DIN 5033-5] DIN 5033 – Blatt 5: *Farbmessung Gleichheitsverfahren*. Januar 1981



- [DIN 5033-6] DIN 5033 – Blatt 6: *Farbmessung Dreibereichsverfahren*. August 1976
- [DIN 5033-7] DIN 5033 – Blatt 7: *Farbmessung Meßbedingungen für Körperfarben*. Januar 1982
- [DIN 5033-9] DIN 5033 – Teil 9 (Entwurf): *Farbmessung Weißstandard für Farbmessung und Photometrie*. November 2004
- [DIN 55 944] DIN 55 944: *Farbmittel – Einteilung nach koloristischen und chemischen Gesichtspunkten*. November 2003
- [DIN 55 945] DIN 55 945: *Beschichtungsstoffe und Beschichtungen – Ergänzende Begriffe zu DIN EN ISO 4618*. März 2007
- [DIN 6175-1] DIN 6175 – Teil 1: *Farbtoleranzen für Automobillackierungen Unilackierungen*. Juli 1986
- [DIN 6175-2] DIN 6175 – Teil 2: *Farbtoleranzen für Automobillackierungen Effektlackierungen*. März 2001
- [DIN EN ISO 4618] DIN EN ISO 4618: *Beschichtungsstoffe – Begriffe (ISO 4618:2006)*. März 2007
- [ISO 12647] ISO 12647: *Prozesskontrolle für die Herstellung von gerasterten Farbausügen*. Juni 2006
- [ISO 2846-1] ISO 2846 – Teil 1: *Drucktechnik – Spezifikationen der Farbe und Transparenz von Skalendruckfarben - Bogen- und Heat-set- Rollenoffsetdruck*. November 2006
- [ISO 2846-5] ISO 2846 - Teil 5: *Drucktechnik – Spezifikationen der Farbe und Transparenz von Skalendruckfarben – Flexodruck*. März 2005

**Patente:**

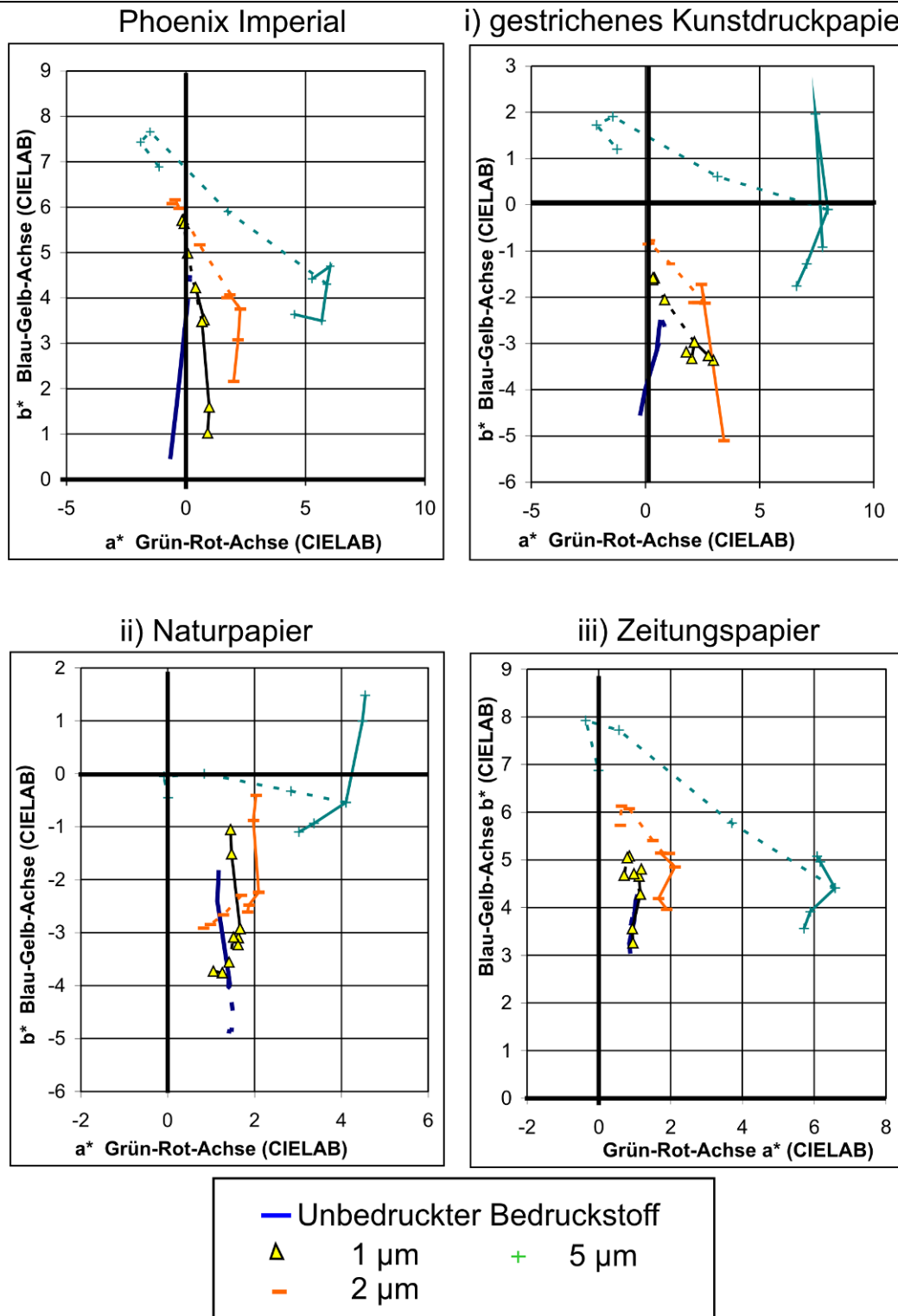
- [HUP07c] Hupp; Dörsam: Patentanmeldung Aktenzeichen:  
10 2007 041 390.6: *Verfahren und Vorrichtung für die messtechnische Erfassung von einer auf einen Bedruckstoff aufgetragenen Farbschicht*. Anmeldetag 31.08.2007
- [HUP07d] Hupp; Dörsam Gebrauchsmusteranmeldung Aktenzeichen:  
20 2007 012 197.0: *Vorrichtung für die messtechnische Erfassung von einer auf einen Bedruckstoff aufgetragenen Farbschicht*. Anmeldetag 31.08.2007
- [HUP07e] Hupp; Dörsam: Patentanmeldung Aktenzeichen:  
10 2007 061 899.0: *Verfahren zur messtechnischen Erfassung von einer auf einen Bedruckstoff aufgetragenen Farbschicht*. Anmeldetag 20.12.2007

## **A Anhang: Zusätzliche Auswertungen zu Kapitel 5**

Im Anhang A werden zusätzlich zu den in Kapitel 5 „Messgeometrien zur Qualitätskontrolle“ dargestellten Auswertungen, die ermittelte Veränderung der Farbwirkung bei variierender gedruckter Farbschichtdicke von LithoRed für alle Bedruckstoffe dargestellt (Anhang A1). Darüber hinaus wird im zweiten Abschnitt (Anhang A2) der Helligkeitsverlauf  $L^*$  über der gedruckten Farbschichtdicke angegeben, welcher für die Interferenzeffekt-druckfarben LithoRed und LithoBlue auf den unterschiedlichen Bedruckstoffen ermittelt werden konnte. Der letzte Abschnitt dieses Anhangs (Anhang A3) gibt eine Übersicht über die in Druckfarben eingesetzten Effektpigmentgrößen und Hinweise zu Verarbeitung der Druckfarben im Druck.

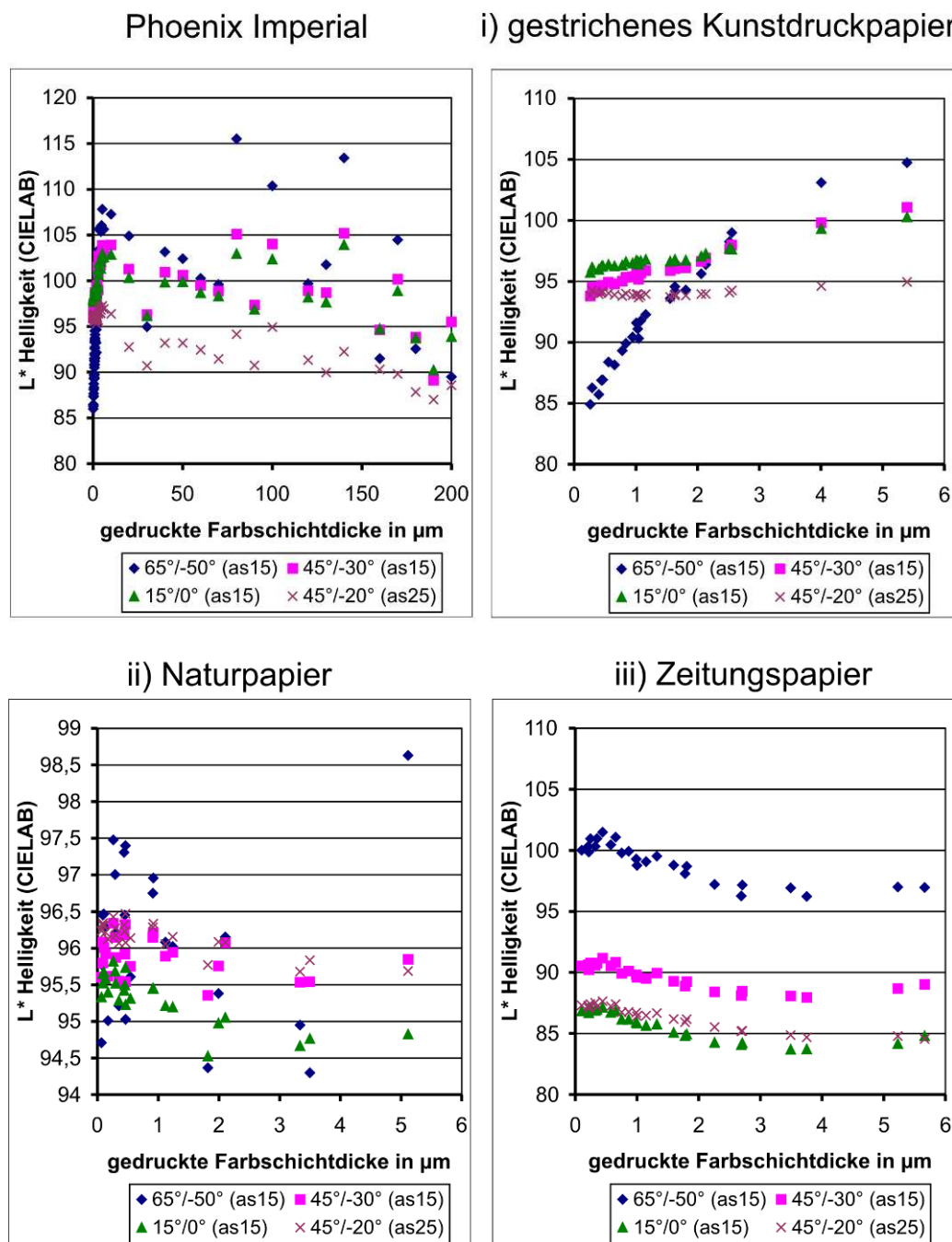
### **A.1 Verhalten gedruckter Interferenzeffektfarben (LithoRed) auf unterschiedlichen Bedruckstoffen**

Wie für die Interferenzeffektfarbe LithoBlue gezeigt werden konnte, ergibt sich auch für die Interferenzeffektfarbe LithoRed eine von der gedruckten Farbschichtdicke abhängige Veränderung der Farbwirkung. Mit größer werdender Farbschichtdicke kommt es zu einer Verschiebung der Interferenzlinie (durchgezogene Linie) in Richtung rot ( $+a^*$ -Werte). Für eine Farbschichtdicke von  $1\text{ }\mu\text{m}$  zeigt sich für die meisten Bedruckstoffe (Ausnahme: gestrichenes Kunstdruckpapier) ein durch die Bedruckstofffarbe geprägtes Verhalten bezüglich der Farbwirkung. Im Falle des gestrichenen Kunstdruckpapiers und des Naturpapiers kommt es zu einer Verschiebung der gesamten Charakteristik (Interferenz- und Aspektlinie) entlang der  $b^*$ -Achse in Richtung Blau. Diese Verschiebung ist auf die Verwendung von optischen Aufhellern in diesen Papieren zurückzuführen. Das Zeitungspapier und der Bedruckstoff Phoenix Imperial hingegen zeigen von sich aus eine eher gelbliche Farbwirkung, die sich auch in den Ergebnisse der auf ihnen gedruckten Farbschichten widerspiegelt.

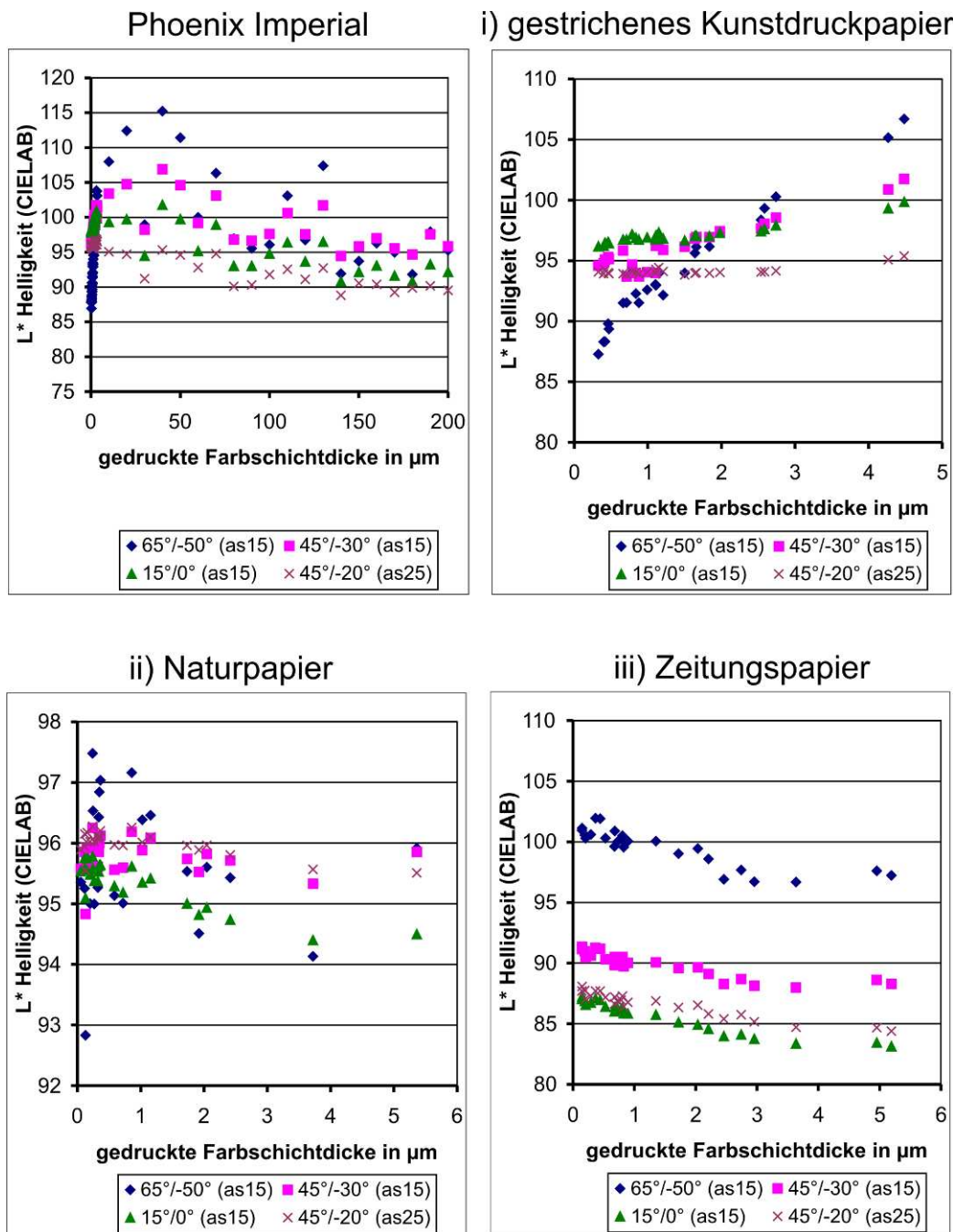


Abbildung\_Anhang 1: Verhalten der gedruckten Interferenzeffektfarbe LithoRed auf unterschiedlichen Bedruckstoffen im Vergleich zum Hauptbedruckstoff Phoenix Imperial: i) gestrichenes Kunstdruckpapier, ii) Naturpapier und iii) Zeitungspapier

Wie in den beiden folgenden Abbildungen (Abbildung\_Anhang 2 und Abbildung\_Anhang 3) zu sehen ist, ergibt sich für die Messgeometrien mit einer Beobachtung nahe des Glanzwinkels (Messgeometrien mit  $as \leq 25^\circ$ ) ein uneinheitliches Verhalten der Helligkeit  $L^*$  bei einer Variation der gedruckten Farbschichtdicke.



Abbildung\_Anhang 2: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien nahe des Glanzwinkels (Messgeometrien mit  $as \pm 15^\circ$ ) für unterschiedliche Bedruckstoffe am Beispiel LithoBlue.



Abbildung\_Anhang 3: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien nahe des Glanzwinkels (Messgeometrien mit  $as \pm 15$ ) für unterschiedliche Bedruckstoffe am Beispiel LithoBlue.

Für Messgeometrien mit einer Beobachtung nahe des Glanzwinkels (Messgeometrien mit  $\alpha_s \geq 45^\circ$ ) hingegen ist für den Druck aufsteigender Farbschichtdicke für alle Bedruckstoffe und beide Interferenzeffektfarben eine abnehmende Tendenz der Helligkeit  $L^*$  festzustellen. Für sehr große Farbschichtdicken wird darüber hinaus ein Helligkeitsgrenzwert  $L^*_{\text{grenz}}$  angestrebt, wie für den Bedruckstoff Phoenix Imperial gezeigt werden konnte.

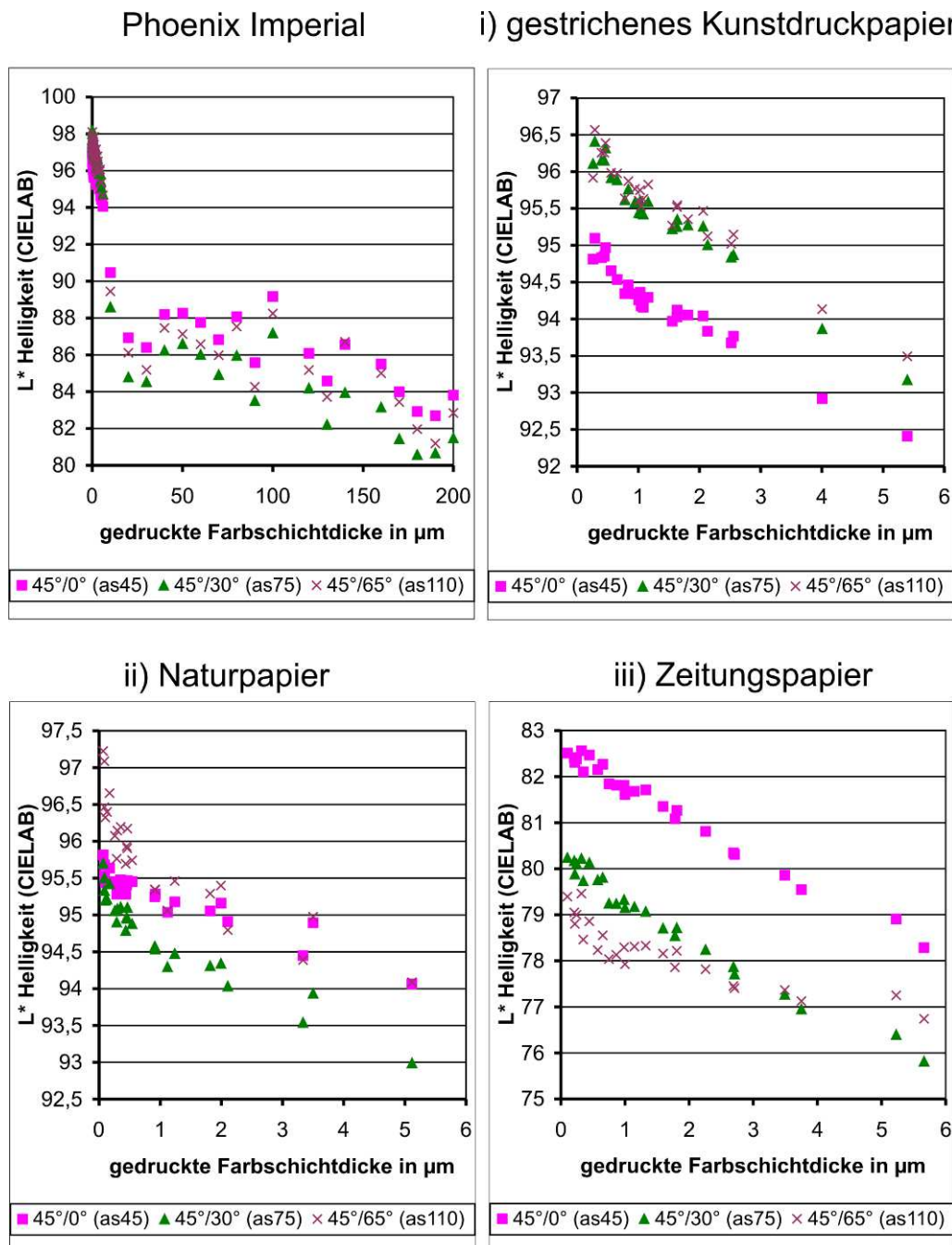
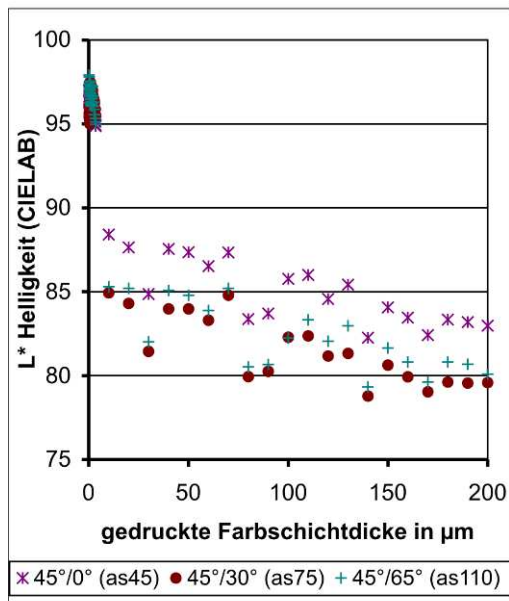
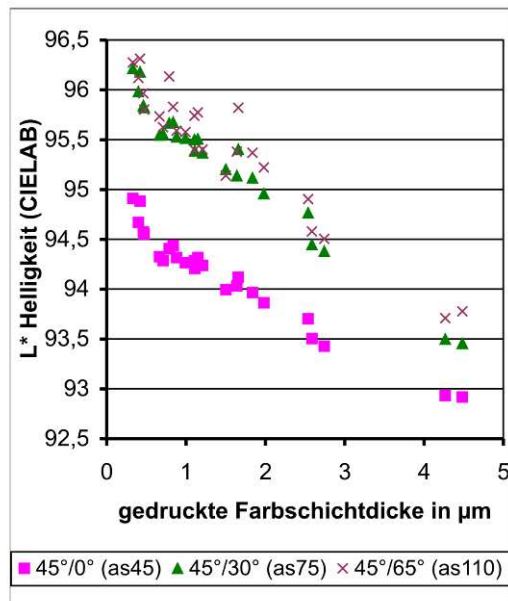


Abbildung Anhang 4: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien weit weg vom Glanz ( $45^\circ/0^\circ$  (as45),  $45^\circ/30^\circ$  (as75) und  $45^\circ/65^\circ$  (as110)) für unterschiedliche Bedruckstoffe am Beispiel LithoBlue.

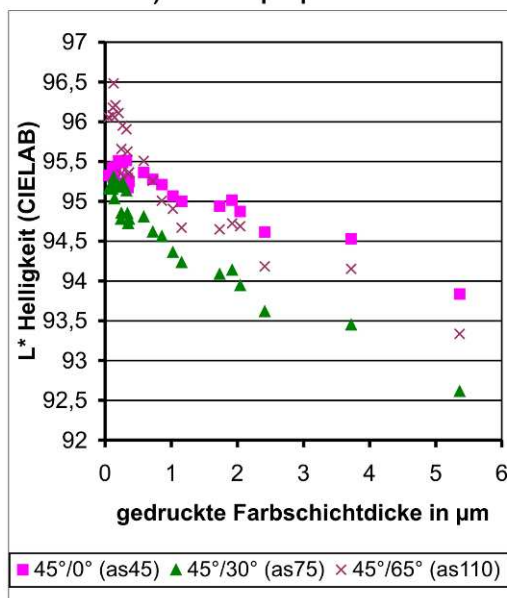
## Phoenix Imperial



## i) gestrichenes Kunstdruckpapier



## ii) Naturpapier



## iii) Zeitungspapier

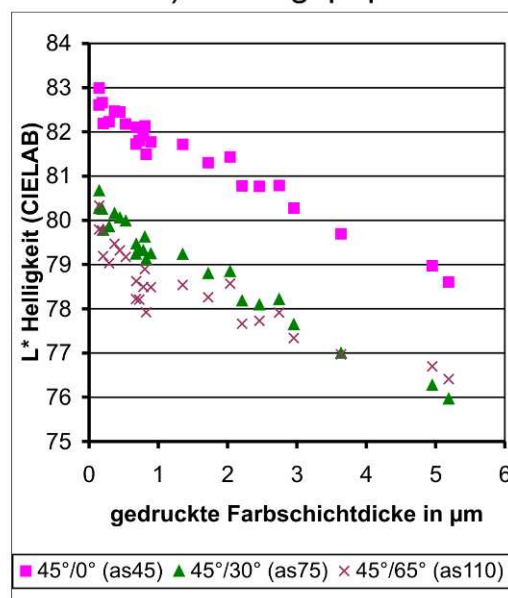


Abbildung Anhang 5: Veränderung der Helligkeit  $L^*$  in Abhängigkeit der Farbschichtdicke bei einer Messung in Messgeometrien weit weg vom Glanz ( $45^\circ/0^\circ$  (as45),  $45^\circ/30^\circ$  (as75) und  $45^\circ/65^\circ$  (as110)) für unterschiedliche Bedruckstoffe am Beispiel LithoRed.



## A.2 Interferenzeffektpigmente in Druckfarben

„Effektpigmente können im Tief-, Flexo-, Sieb- und Offsetdruck sowie in der Überdrucklackierung eingesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Farbschichtdicken und der physikalischen Eigenschaften der Pigmente gilt in diesen Druckfarben: je dicker die Schichtdicke, desto stärker der Effekt. ... Bedingt durch die Offsetdrucktechnik können in diesem Verfahren ausschließlich mit Effektpigmenten bis zu 25 µm seidig glänzende Effekte realisiert werden.“ [MER07a]

In der nachfolgenden Tabelle\_Anhang 1 ist eine Übersicht über einige Effektpigmente der ersten und zweiten Generation mit zugeordneter Größenverteilung der Pigmente und den möglichen Druckverfahren dargestellt.

*Tabelle\_Anhang 1: Übersicht über die in den unterschiedlichen Druckverfahren einsetzbaren Teilchengrößen unterschiedlicher Interferenzeffektpigmente (in Anlehnung an [MER07a])*

Pigmentart	Teilchengröße	Effektgestaltung	mögliche Druckverfahren
Iridin Glimmerbasierte Interferenz- effektpigmente (Interferenz- effektpigmente der ersten Generation)	< 15 µm	hohes Deckvermögen, seidiger Glanz	Offset-, Flexo-, Tief-, und Siebdruck, Überdruck- lackierung (Kammerrakel)
	5 - 25 µm		
	10 - 60 µm	mittleres Deckvermögen, typischer Perglanz	Flexo-, Tief- und Siebdruck, Überdruck- lackierung (Kammerrakel)
	10 - 100 µm	geringes Deckvermögen, Glitzereffekte	Flexo-, Tief- und Siebdruck, Überdruck- lackierung (Kammerrakel)
	10 - 125 µm		
Colorstream	10 - 50 µm	ineinander fließende Farbwechsel	Flexo-, Tief- und Siebdruck, Überdruck- lackierung (Kammerrakel)
Xirallic	10 - 40 µm	stark glitzernd und farbintensiv	Siebdruck

Nach [PFA07a] liegt der durchschnittliche Teilchendurchmesser von Interferenzeffektpigmenten der ersten Generation zwischen  $\varnothing 5 \mu\text{m}$  und  $\varnothing 125 \mu\text{m}$ . Damit ist der mittlere Plättchendurchmesser wesentlich größer als die Lichtwellenlänge. Im Vergleich hierzu liegen die Pigmentgrößen typischer Absorptionsfarbstoffe zwischen  $\varnothing 0,1 \mu\text{m}$  und  $\varnothing 1 \mu\text{m}$ , also zum größten Teil im Bereich der Lichtwellenlänge ( $\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$ ). Effektpigmente verfügen in der Regel über eine Dicke  $d_{\text{Pigment}} < 1 \mu\text{m}$ . In Tabelle\_Anhang 2 sind die typischen Pigmentkonzentrationen und Pigmentgrößen der unterschiedlichen Druckverfahren dargestellt.

*Tabelle\_Anhang 2: Übersicht über typische Pigmentkonzentrationen und Pigmentgrößen in unterschiedlichen Druckverfahren sowie die Angabe drucktypischer Empfehlungen (in Anlehnung an [MER07b] und [PFA07a])*

Druck- verfahren	Teilchen- größe	Gewichts- anteil	Erzielbare Effekte	Viskosität (DIN4-Becher)	Drucktypische Empfehlungen	
Tiefdruck	5 - 25 µm	30 Gew.-%	seidig glänzend	15 - 25 sec	Druckzylinder mit 60 - 70 Linien/cm	Näpfchenöffnungswinkel 120°, Näpfchentiefe bis 50 µm, Verhältnis Napf-/Stegbreite darf nicht kleiner als 5:1 sein
	10 - 60 µm	25 Gew.-%	hohe Brillanz		Druckzylinder mit 40 - 60 Linien/cm	
Siebdruck	5 - 25 µm, 10 - 60 µm	8 - 15 Gew.-%	seidig bis brilliant	-	Die Maschenweite muss 1,5 bis 2,5 mal größer als die max. Teilchengröße gewählt werden	
Flexodruck	5 - 25 µm	< 30 Gew.-%	seidig	wasserbasierte Farben: 40 - 60 sec	Rasterwalze 80 - 120 Linien/cm	Theoretisches Schöpfungsvolumen: 6 - 13 cm³/m²
	10 - 60 µm	10 - 25 Gew.-%	hohe Brillanz	Lösemittelbasierte Farben: ≈ 25 sec	Rasterwalze 60 - 100 Linien/cm	Theoretisches Schöpfungsvolumen: 13 - 20 cm³/m²
Offsetdruck	5 - 25 µm	≤ 35 Gew.-%	seidig	-	pH-Wert des Feuchtmittels ≤ 4,5 Empfehlung für Gummitücher: polierte Oberfläche und Karkasse mit niedriger Dehnbarkeit und großer Härte	
Überdruck- lackierung	10 - 60 µm	10 - 25 Gew.-%	hohe Brillanz	wasserbasierte Farben: 40 - 60 sec Lösemittelbasierte Farben: ≈ 25 sec	Rasterwalze 60 - 100 Linien/cm	Theoretisches Schöpfungsvolumen: 13 - 20 cm³/m²

Die folgende Tabelle\_Anhang 3 zeigt die Eigenschaften (Brechungsindex, Dichte und Dicke) der am Aufbau eines Interferenzeffektpigments beteiligten Stoffe.

*Tabelle\_Anhang 3: Eigenschaften der am Aufbau eines Effektpigments beteiligten Stoffe sowie des Gesamtpigments (in Anlehnung an [PFA07a])*

	Brechungsindex	Dichte in g/cm³	Dicke in µm	Anteil
Glimmer	1,6	2,77 - 2,88	0,1 - 0,8	70%
Titandioxid TiO <sub>2</sub> Rutil-Modifikation	2,6	4,26	0,02 - 0,16	30%
Gesamteffektpigment	-	3	0,1 - 2	-

## B Anhang: Zusätzliche Auswertungen zu Kapitel 6

Im Anhang B werden zusätzlich zu den in Kapitel 6 „Messgröße zur Prozesskontrolle“ dargestellten Auswertungen, Ergebnisse der im Kapitel 6 nicht dargestellten Druckfarben aufgeführt. Anhang B1 und Anhang B2 geben die Ergebnisse der Druckfarben LithoBlue und LithoWhite in Bezug auf die Auswertung der Dichte in der Messgeometrie  $45^\circ/0^\circ$  und  $45^\circ/-30^\circ$  wieder. In Anhang B3 werden die Ergebnisse des Übereinanderdrucks der Interferenzeffektdruckfarben LithoBlue und LithoWhite auf Schwarz konstanter und variabler gedruckter Farbschichtdicke gezeigt. Die Anhänge B4 und B5 widmen sich der Gegenüberstellung der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für  $L_H$  unterschiedlicher Druckfarben und Messgeräte. In Anhang B6 wird die lineare Approximation der für unterschiedliche Bedruckstoffe ermittelten Messwerte  $L_H$  dargestellt.

### B.1 Auswertung der Dichte ( $D_K$ , $D_C$ , $D_M$ und $D_Y$ )

Es zeigt sich, wie schon für LithoRed im Rahmen des Kapitels 6 erläutert lediglich ein sehr leichter Anstieg der Dichte. Hierbei ist die größte Veränderung mit aufsteigender gedruckter Farbschichtdicke im Gelb-Kanal mit  $\Delta D_Y \approx 0,15$  festzustellen.

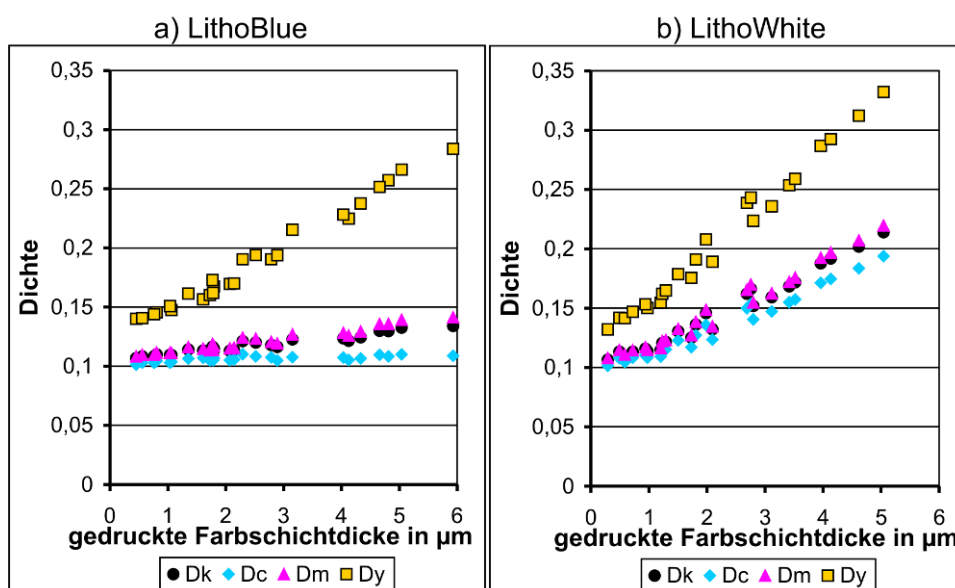


Abbildung Anhang 6: Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ), gemessen mit dem Filterdensitometer des Leitstandssystems FM19; Druckfarben: a) LithoBlue und b) LithoWhite.  $\Delta D_{\max} = \Delta D_Y \approx 0,15$

## B.2 Auswertung der Dichte in der Messgeometrie 45°/-30°

Auch bei einer Messung mit der Messgeometrie 45°/30° lassen sich für LithoBlue und LithoWhite nur sehr kleine Veränderungen der Dichte  $\Delta D_{max} < 0,25$  feststellen.

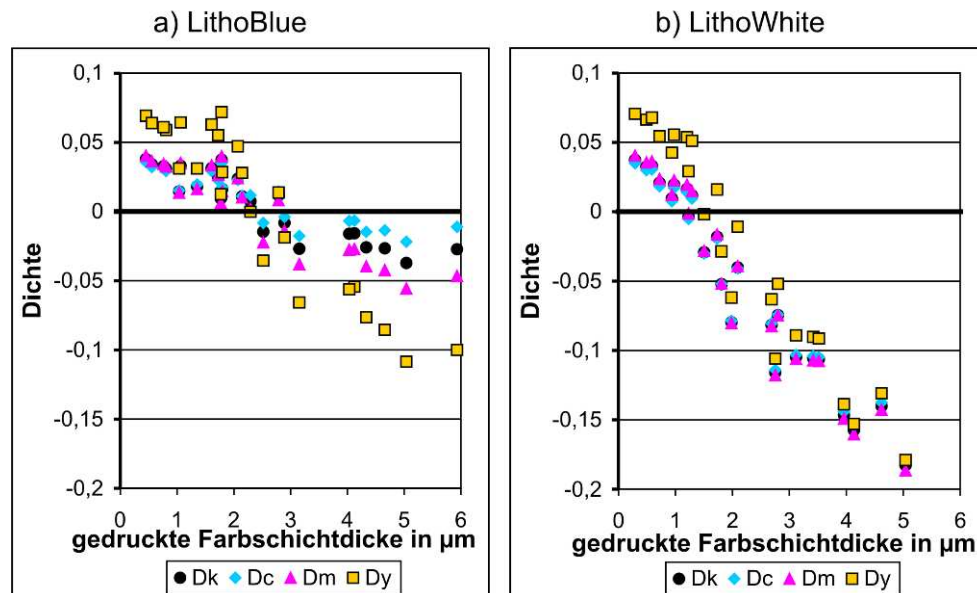
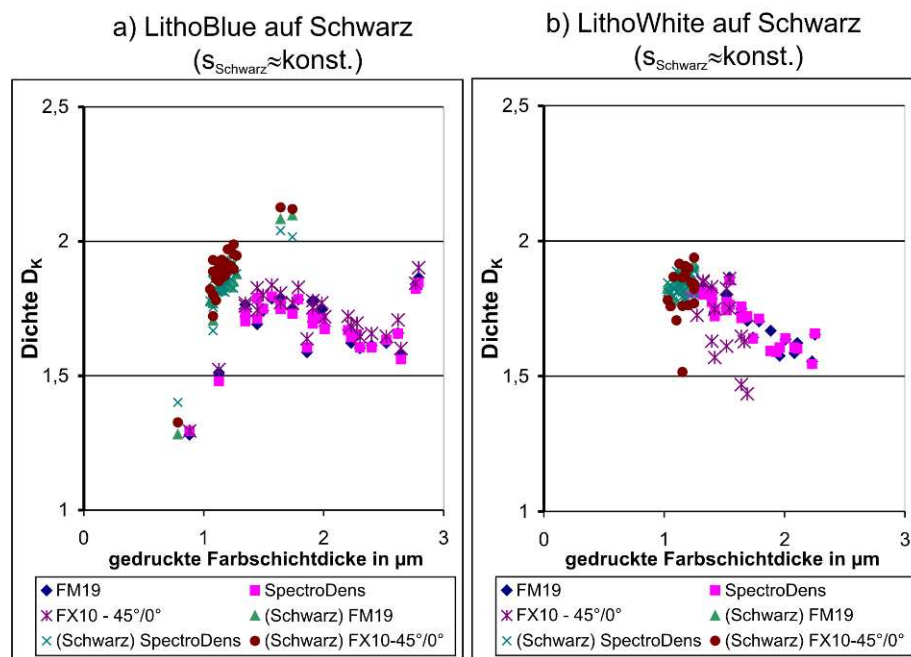
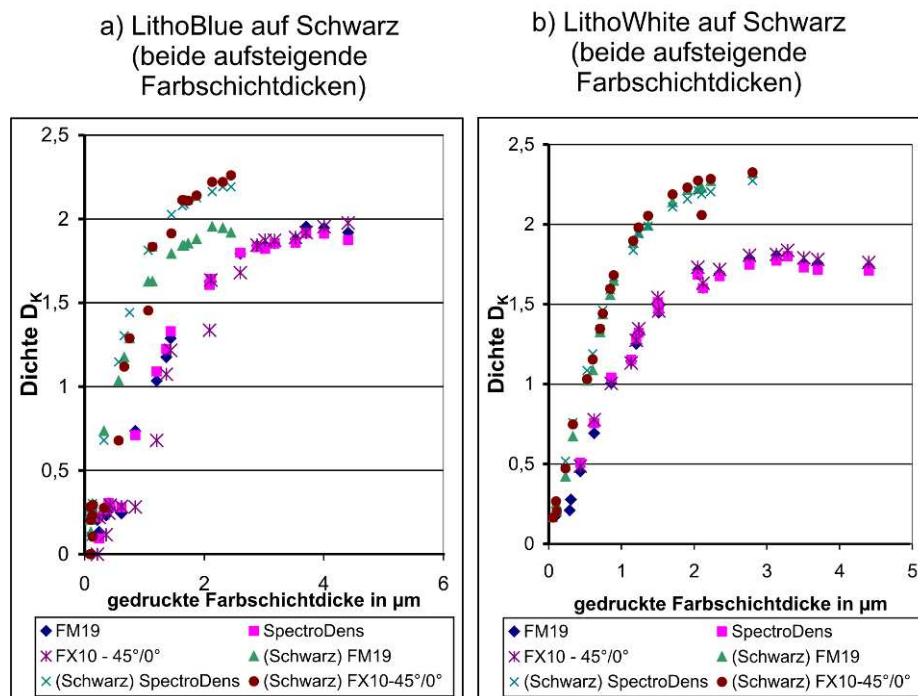


Abbildung Anhang 7: Messergebnisse der Dichte ( $D_C$ ,  $D_M$ ,  $D_Y$  und  $D_K$ ) mit aufsteigender gedruckter Farbschichtdicke für die Messgeometrie 45°/-30° (as15) als Repräsentant für eine Beobachtung nahe des Glanzes; Druckfarben: a) LithoBlue und b) LithoWhite.

### B.3 Auswertung des Übereinanderdrucks der Interferenzfarbe auf Schwarz



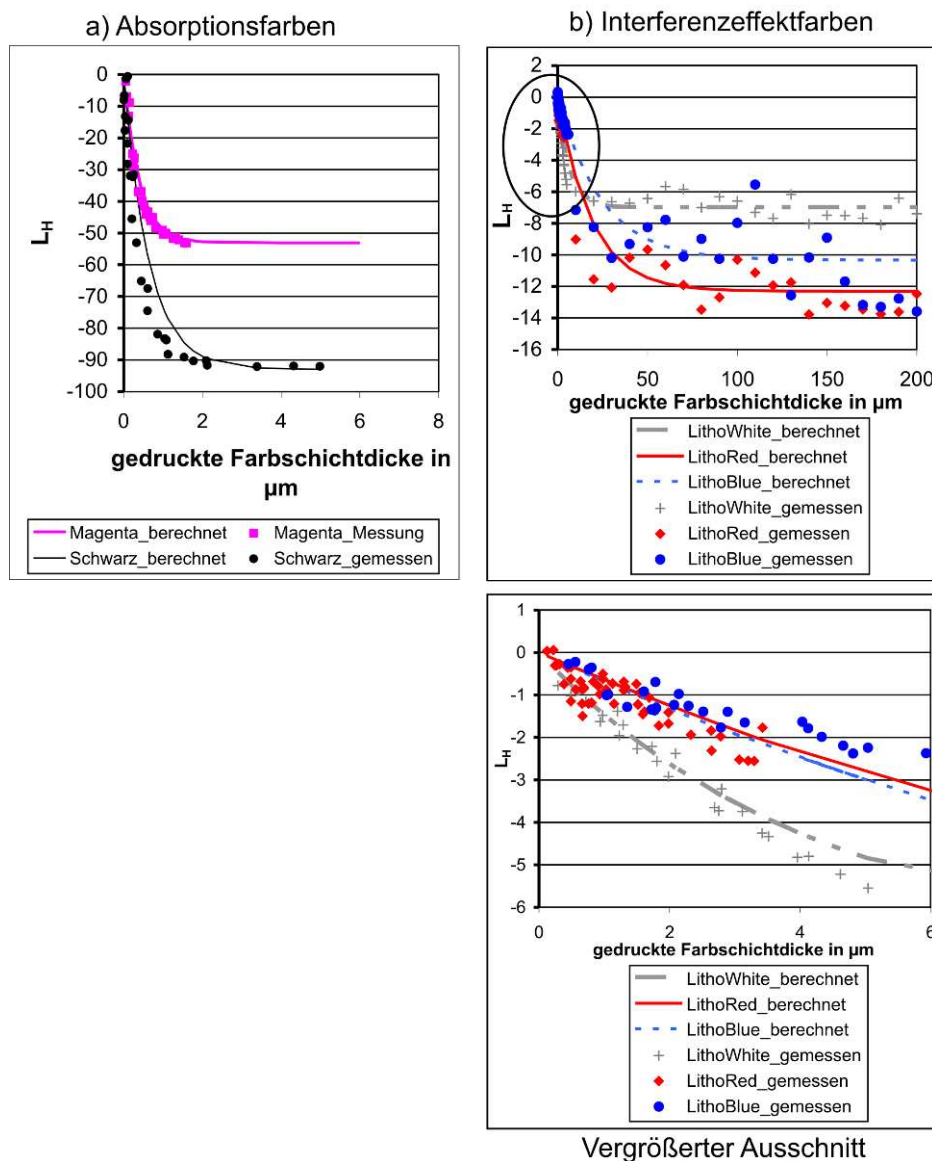
Abbildung\_Anhang 8: Dichte im Schwarzkanal  $D_K$  für den Übereinanderdruckbereich von a) LithoBlue und b) LithoWhite auf Schwarz und den Einzelfarb-Druckbereich der Druckfarbe Schwarz mit konstant gehaltener Farbschichtdicke ( $s_{\text{Schwarz}} \approx 1$ )



Abbildung\_Anhang 9: Dichte im Schwarzkanal  $D_K$  für den Übereinanderdruckbereich von a) LithoBlue und b) LithoWhite auf Schwarz und den Einzelfarb-Druckbereich der Druckfarbe Schwarz. mit variiert Farbschichtdicke

Auch im Übereinanderdruck der Interferenzeffektdruckfarben LithoBlue und LithoWhite kann sowohl für den Aufdruck auf Schwarz konstanter Farbschichtdicke als auch den Aufdruck auf Schwarz variabler Farbschichtdicke eine Veränderung der Dichte  $D_K$  feststellen. Diese ist im Falle des Aufdrucks auf Schwarz variabler Farbschichtdicke (Abbildung\_Anhang 9) deutlich besser identifizierbar als im Falle des Aufdrucks auf Schwarz konstanter Farbschichtdicke. Dies führt zu der Überlegung die Auswertung der Messgröße  $D_0$  für den Fall des Aufdrucks auf Schwarz variabler Farbschichtdicke durchzuführen.

## B.4 Gegenüberstellung der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für $L_H$ für unterschiedliche Druckfarben

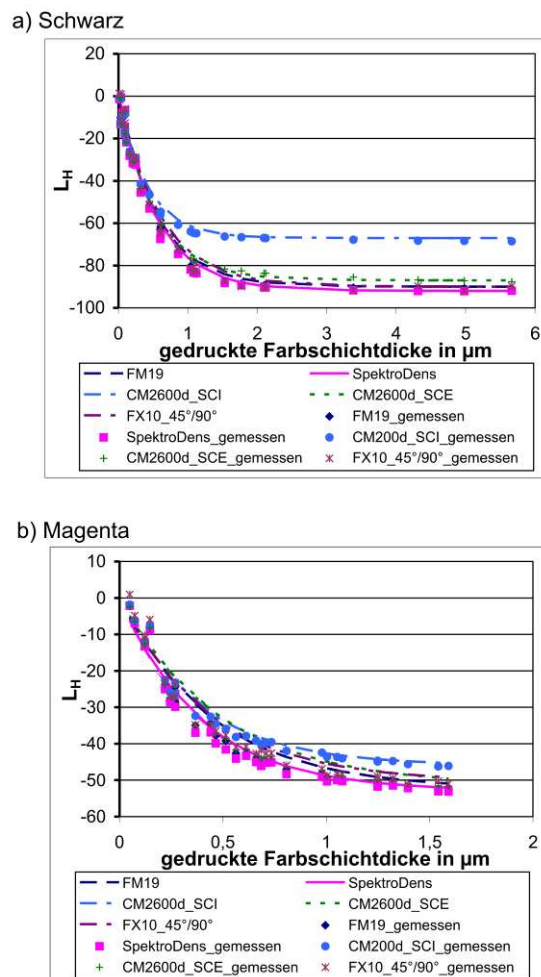


Abbildung\_Anhang 10: Gegenüberstellung der Veränderungen in der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für  $L_H$  für unterschiedliche Druckfarben: a) Absorptionsfarben (Magenta und Schwarz), b) Interferenzeffektfarben (LithoWhite, LithoRed und LithoBlue); Messgerät: SpektroDens

Bei den Interferenzeffektdruckfarben zeigen sich große Schwankungen der Messgröße  $L_H$  für sehr große Farbschichtdicken. Dies ist auf die nur unzureichende Genauigkeit der Applikation der Farbschichtdicke über das Stufenspaltraket zurückzuführen. Für die Absorptionsfarben und kleine bis mittlere gedruckte Farbschichtdicken der Interferenzeffektfarben kann eine gute Approximation durch die Beschreibungsfunktion angegeben werden.

## B.5 Gegenüberstellung der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für $L_H$ für unterschiedliche Messgeräte

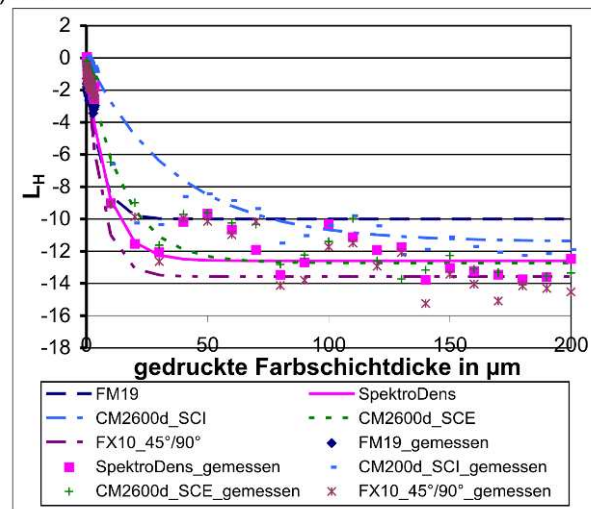
Die gute Approximation der Absorptionsfarben zeigt sich auch für die Messergebnisse  $L_H$  anderer Messgeräte (Abbildung\_Anhang 11 und Abbildung\_Anhang 12). Für die Interferenzeffektdruckfarben ergibt sich auch bei den anderen Messgeräten eine große Streuung der Messergebnisse für sehr große gedruckte Farbschichtdicken. Die, wie bereits bemerkt, auf die unzureichende Genauigkeit der Applikation mittels Stufenspaltrassel zurückführbar ist. Dennoch ist auch hier eine ausreichend gute Approximation der Messergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte durch die Beschreibungsfunktion möglich



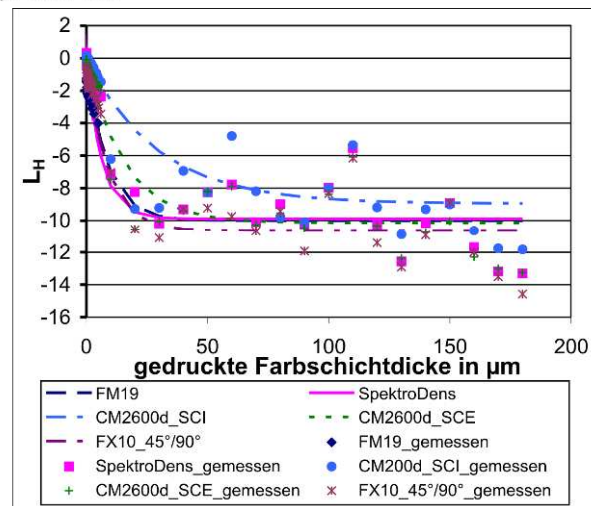
Abbildung\_Anhang 11: Gegenüberstellung der Veränderungen in der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für  $L_H$  für unterschiedliche Messgeräte: a) Absorptionsfarbe Magenta und b) Absorptionsfarbe Schwarz



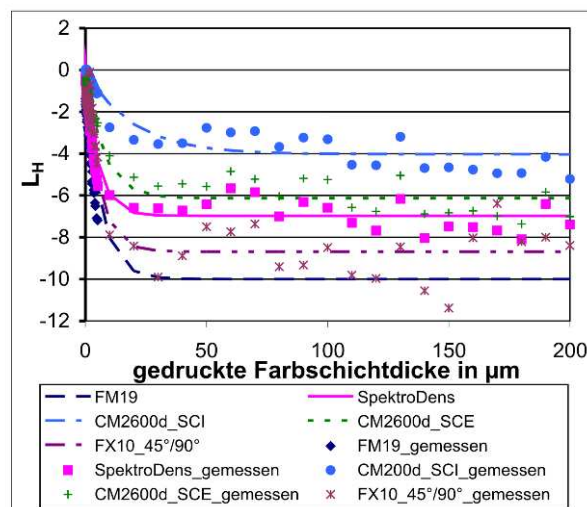
a) LithoRed



b) LithoBlue



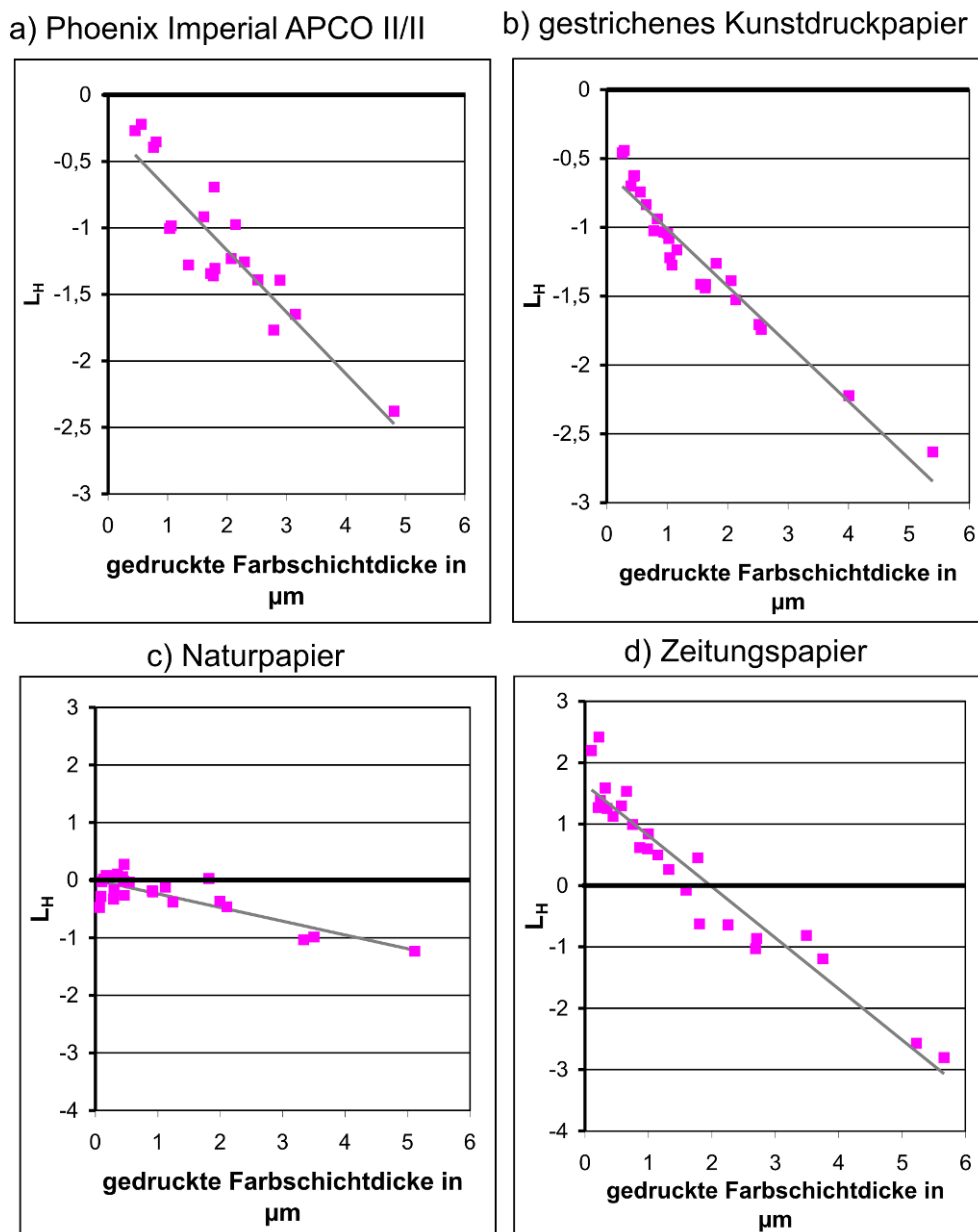
c) LithoWhite



Abbildung\_Anhang 12: Gegenüberstellung der Veränderungen in der Beschreibungsfunktion und der Messwerte für  $L_H$  für unterschiedliche Messgeräte: a) LithoRed, b) LithoBlue und c) LithoWhite

## B.6 Lineare Approximation der Messergebnisse für $L_H$ für die Interferenzeffektdruckfarbe LithoBlue

Zur Betrachtung des Verhaltens gedruckter Interferenzeffekt- Farbschichten auf anderen Bedruckstoffen wurde neben LithoRed noch die Interferenzeffektdruckfarbe LithoBlue betrachtet. Mit Ausnahme des Naturpapiers können die Messwerte  $L_H$  durch eine lineare Approximation (lineare Regression) gut abgebildet werden.



Abbildung\_Anhang 13: Darstellung der Ergebnisse der Größe  $L_H$  für die Interferenzeffektfarbe LithoBlue und der Approximation durch eine Regressionsgerade für vier unterschiedliche Bedruckstoffe, a) Phoenix Imperial APCO II/II, b) gestrichenes Kunstdruckpapier, c) Naturpapier und d) Zeitungspapier; Messgerät: SpektroDens

## C Papierkennwerte

Im Rahmen der Arbeit wurden für die verwendeten Papiersorten experimentell einige charakterisierende Papierkennwerte ermittelt. Hierzu wurden die Messgeräte und Vorgehensweise der Papierprüfung herangezogen. Es ergaben sich die nachfolgend in tabellarischer Form aufgeführten Papierkennwerte.

*Tabelle\_Anhang 4: Experimentell ermittelte Kennwerte der unterschiedlichen Bedruckstoffe*

Eigenschaften	Einheit	Bedruckstoffe (Papiersorten)			
		Phoenix Imperial	gestrichenes Kunstdruckpapier	Naturpapier	Zeitungspapier
Flächengewicht	g/m <sup>2</sup>	150	150	80	50
Dicke	µm	104	96	57,8	95,8
Glanz DIN 45°	%	51,7	50,7	0,5	1,1
Weißgrad WI CIE D65/10°	%	68,32	120,85	141,1	43,75
Glätte (nach Bekk)	Bs	1248,7	1418,7	23,5	83,13
Rauigkeit (nach Parker-Print-Surf)	µm	0,66	0,68	6,84	4,39
Saugfähigkeit (Volumenverlust)	%	75	35	nicht ermittelt	nicht ermittelt
Wasseraufnahme	g/m <sup>2</sup>	14,73	38,66		
Opazität	%	92,23	94,92	89,88	96,73

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Heike Hupp geb. Greif  
Geburtsdatum: 23.11.1976  
Geburtsort: Marburg  
Anschrift: Hauptstrasse 79, 97840 Hafenlohr  
Familienstand: verheiratet  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Schulbildung:

1983 – 1987 Theodor-Heuss-Schule (Grundschule) in Marburg  
1987 – 1996 Elisabethschule (Gymnasium) in Marburg  
1996 Abitur

## Studium:

1996 – 2002 Studium an der Technischen Universität Darmstadt,  
Studiengang Allgemeiner Maschinenbau  
2002 Abschluss als Diplom-Ingenieur

## Berufstätigkeit:

2003 – 2008 Wissenschaftliche Mitarbeiterin von Prof. Dr.-Ing.  
E. Dörsam, Fachgebiet Druckmaschinen und Druck-  
verfahren , Technische Universität Darmstadt

Hafenlohr, den 20. Januar 2008

Heike Hupp